

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2015

Bc. Jan Navrátil

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Měření charakteristik LED pro automobilový  
průmysl**  
**Measurement of LED characteristics in  
automotive industry**

2015

Bc. Jan Navrátil

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Navrátil**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Měření charakteristik LED pro automobilový průmysl**  
**Measurement of LED characteristics in automotive industry**

### Zásady pro vypracování:

- o Požadavky na automobilové svítidly
- o Světelné zdroje vhodné pro automobilové osvětlení se zaměřením na LED
- o Možnosti měření charakteristik automobilových svítilen
- o Návrh metodik měření LED
- o Vyhodnocení chování LED z realizovaných měření
- o Porovnání naměřených hodnot s údaji udávanými výrobcí LED

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [4] Katalogy LED

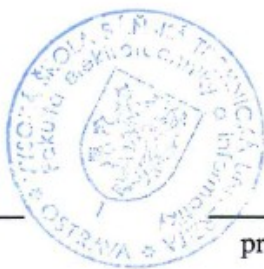
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*

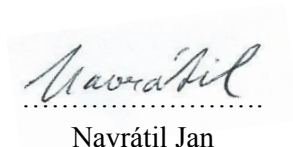


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

### **Čestné prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a internetové stránky, ze kterých jsem čerpal.

Datum odevzdání: 7. května 2015



Navrátil Jan

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D. za rady a doporučení při vypracovávání této práce.

Poděkování patří také panu Ing. Františku Dostálovi, Ph.D. za ochotu, umožnění provedení měření a poskytnutí materiálů a Bc. Marku Kouřilovi za ochotu a cenné připomínky.

## **Abstrakt**

### **Měření charakteristik LED pro automobilový průmysl**

Tato práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části poukazuje na problematiku měření fotometrických a kolorimetrických veličin LED v automobilovém průmyslu. Začíná popisem požadavků na automobilové svítidly, pokračuje jednotlivými druhy, principy a využitím světelných zdrojů. Teoretická část je zakončena způsoby měření automobilových svítidel.

Praktická část je potom zaměřena na analýzu charakteristik LED získaných měřeními na automobilových svítidlech ve firmě Hella Autotechnik s.r.o. v Mohelnici. Měření jsou zaměřena na prototypové (vývojové) zkoušky LED světelných zdrojů a svítidel. Samotným měřením předchází popis a vysvětlení zvolených metodik měření.

Cílem písemné práce je obeznámení se s požadavky na automobilové svítidly, se způsoby jejich ověřování a prohloubení znalostí chování LED v podobě jejich vyhodnocování měřeními se snahou o invenci.

### **Klíčová slova**

LED, automobilové osvětlení, měření LED, goniofotometr, kolorimetr, spektrální analyzátor, jasový analyzátor, LED binning

## **Abstract**

### **Measurement of LED characteristics in automotive industry**

This thesis is divided into theoretical and practical part. In the theoretical part it refers to issue of measuring photometric and colorimetric quantities of LED in automotive industry. Including description of the requirements for automotive lamps through types, principles and use of light sources and measuring methods of automobile lamp.

The practical part is focused on the analysis of LED characteristics obtained by the measurement made on automotive lamps in Hella Autotechnik s.r.o. Mohelnice. Measurements are focused on development testing of LED light sources and lamps prototypes. The measurement itself is preceded by a description and explanation of the selected measurement methods.

The aim of the thesis is to get familiar with requirements for lamps in automotive industry, methods of verification and deepening knowledge of the behavior of LED in the form of evaluating measurement to the effort of inventiveness.

### **Keywords**

LED, automotive lighting, LED measuring, goniophotometer, colorimeter, spectral analyzer, brightness analyzer, LED binning

## Seznam použitých symbolů a zkratek

<b>Symbole</b>	<b>Význam</b>
E	Osvětlenost
H	Horizontální
I	Svítivost
$I_{\max}$	Hodnota maximální svítivosti
K	Kelvin – jednotka teploty chromatičnosti
L	Jas
$R_a$	Index podání barev
$T_c$	Teplota chromatičnosti (náhradní teplota chromatičnosti)
V	Vertikální
$V(\lambda)$	Křivka citlivosti lidského oka
$\lambda$	Vlnová délka
$\varphi$	Světelný tok

<b>Zkratky</b>	<b>Význam</b>
Apod.	A podobně
Atd.	A tak dále
Bin	Třída svítivosti, barevnosti, propustného napětí
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
ECE	Evropská hospodářská komise
LED	Light-Emitting Diode – dioda emitující světlo
Např.	Například
Obr.	Obrázek
PCB	Printed Circuit Board – deska plošných spojů
Pozn.	Poznámka
Tab.	Tabulka
Tj.	To jest
Tzn.	To znamená
Tzv.	Takzvaně

Pokud v tomto seznamu nejsou některé zkratky uvedeny, jsou vysvětleny přímo v textu.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>3</b>
<b>1 POŽADAVKY NA AUTOMOBILOVÉ SVÍTILNY .....</b>	<b>4</b>
1.1 VŠEOBECNÉ SPECIFIKACE .....	4
1.2 JEDNOTLIVÉ SPECIFIKACE .....	6
1.2.1 Dálkový světlomet .....	6
1.2.2 Potkávací světlomet .....	9
1.2.3 Přední mlhový světlomet.....	11
1.2.4 Směrová svítlna.....	13
1.2.5 Brzdové, přední a zadní obrysové svítlny .....	15
1.2.6 Zadní mlhová svítlna.....	17
1.2.7 Denní svítlna .....	18
<b>2 SVĚTELNÉ ZDROJE VHODNÉ PRO AUTOMOBILOVÉ OSVĚTLENÍ SE ZAMĚŘENÍM NA LED .....</b>	<b>20</b>
2.1 HALOGENOVÉ ŽÁROVKY .....	20
2.2 XENONOVÉ VÝBOJKY .....	21
2.3 LED - SVĚTELNÉ DIODY .....	23
2.4 SROVNÁNÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL.....	25
<b>3 MOŽNOSTI MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK AUTOMOBILOVÝCH SVÍTILEN ..</b>	<b>27</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>30</b>
<b>4 NÁVRH METODIK MĚŘENÍ LED.....</b>	<b>31</b>
4.1 MĚŘENÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH VELIČIN.....	31
4.2 MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH VELIČIN KULOVÝM INTEGRÁTOREM PO TEPLTNÍM USTÁLENÍ .....	33
4.3 MĚŘENÍ POKLESU SVĚTELNÉHO TOKU LED S NARŮSTAJÍCÍ TEPLOTOU	33
4.4 MĚŘENÍ LED BĚHEM JEJICH NÁBĚHU, BINOVÁNÍ.....	34
4.5 MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI KOLORIMETRICKÝCH VELIČIN NA VYZAŘOVACÍM ÚHLU .....	35
4.6 MĚŘENÍ JASOVÝM ANALYZÁTOREM .....	36
<b>5 VYHODNOCENÍ CHOVÁNÍ LED Z REALIZOVANÝCH MĚŘENÍ .....</b>	<b>37</b>
5.1 KATALOGOVÉ ÚDAJE LED - SEOUL SSC - Z5 .....	37



5.2	MĚŘENÍ KULOVÝM INTEGRÁTOREM PO TEPLTNÍM USTÁLENÍ .....	38
5.3	MĚŘENÍ POKLESU SVĚTELNÉHO TOKU LED S ROSTOUCÍM ČASEM SVÍCENÍ.....	40
5.4	MĚŘENÍ LED BĚHEM JEJICH NÁBĚHU, ZAŘAZENÍ DO BINU DLE VÝROBCE.....	42
5.4.1	Srovnání naměřených hodnot s hodnotami udávanými výrobcem .....	42
5.5	ZÁVISLOST KOLORIMETRICKÝCH VELIČIN NA HORIZONTÁLNÍM ÚHLU.....	44
5.5.1	Ověření vyzařovací charakteristiky.....	44
5.5.2	Závislost trichromatických souřadnic x, y na horizontálním úhlu .....	45
5.5.3	Závislost trichromatických souřadnic a teploty chromatičnosti na délce prostupu paprsku luminoforem .....	48
5.6	MĚŘENÍ JASOVÝM ANALYZÁTOREM .....	49
5.6.1	Vyhodnocení homogenity jasu tlustostěnné optické plochy .....	50
5.6.2	Vyhodnocení homogenity barvy tlustostěnné optické plochy .....	52
<b>ZÁVĚR.....</b>		<b>54</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>56</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>58</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>59</b>

## ÚVOD

Automobilový průmysl se technologicky neustále posouvá kupředu. Významnou součástí automobilu, jak z pohledu funkčnosti, jež zajišťuje bezpečnost provozu, tak z pohledu designového prvku, který obvykle charakterizuje celkový vzhled automobilu, je automobilové osvětlení.

V posledních letech rozmach a posun v odvětví vývoje automobilového osvětlení je obrovský, a to hlavně kvůli nové technologii světelných zdrojů – LED. Tento světelný zdroj v počátcích nacházel uplatnění především v osvětlení přístrojových desek, později třetích brzdových svítilnách a dále u směrových svítilen. V roce 2007 však nastal velký zlom a LED začaly být využívány ve hlavních funkcích světlometů, s tím přišly nebývalé, nejen designové možnosti, ale také využití výkonného světelného zdroje v kombinaci s bezpečnostními prvky pro maximální osvětlení potřebného prostoru s minimálním oslněním ostatních účastníků provozu (systém Matrix LED). Vše má též i svá negativa, proto je zapotřebí se problematice LED nadále věnovat jako doposud a maximálně využít jejího potenciálu.

Tato písemná práce poukazuje na problematiku LED v automobilovém průmyslu. Obsah je věnován zejména měření světelně technických veličin jak zkouškami typovými, tak prototypovými. Dle zmíněných druhů zkoušek se bude také práce rozdělovat na teoretickou a praktickou.

V teoretické části bude rozvedeno téma požadavků na automobilové osvětlení, které se bude věnovat hlavně evropské legislativě v tomto oboru. První kapitola nejdříve stručně vymezí funkce a účel jednotlivých osvětlovacích zařízení a v další kapitole bude pojednáváno o hlavních kritériích, a to především stanovené svítivosti, barvě světla a obecných požadavcích.

Součástí teoretické části bude také popis světelných zdrojů využívaných v automobilovém průmyslu, počínaje jejich vývojem, parametry, rozdělením a konče jejich vzájemným srovnáním.

Poslední kapitolou této části bude popis metodik měření, předpisy požadovaných světelně technických veličin a zařízení k tomu určených.

Aby mohlo být vyhověno předpisům zmíněným v teoretické části a vysokým nárokům zákazníků, kteří často požadovaná kritéria velmi zpřísňují a navíc pochopitelně kladou důraz na vzhled, je zapotřebí provádět také prototypové zkoušky, kterými se bude zabývat praktická část práce. Prototypové zkoušky, a tedy celou praktickou část, budou vymezovat vyhodnocení charakteristik a chování LED. Měření budou prováděna v LED laboratoři ve firmě Hella Autotechnik s.r.o. a volba typů měření se bude odvíjet od současných potřeb této laboratoře.

Úvodní kapitolou praktické části bude návrh zvolených metodik měření LED. V ní budou uvedena využívaná měřicí zařízení, stručný princip funkce těchto zařízení a popis

metodik již konkrétních měření. Budou prováděna měření světelně technických veličin LED neprodleně po startu (metodika výrobců LED), po teplotním ustálení, měření změn těchto veličin s narůstající teplotou, dále změny barevných vlastností vyzářeného světla s vyzařovacím úhlem a posuzování barevné a jasové homogenity jasovým analyzátozem.

Dále bude navazovat oddíl s výsledky a vyhodnocením provedených měření. Součástí této kapitoly bude taktěž srovnání naměřených veličin s veličinami uvedenými v katalogových listech od výrobce.

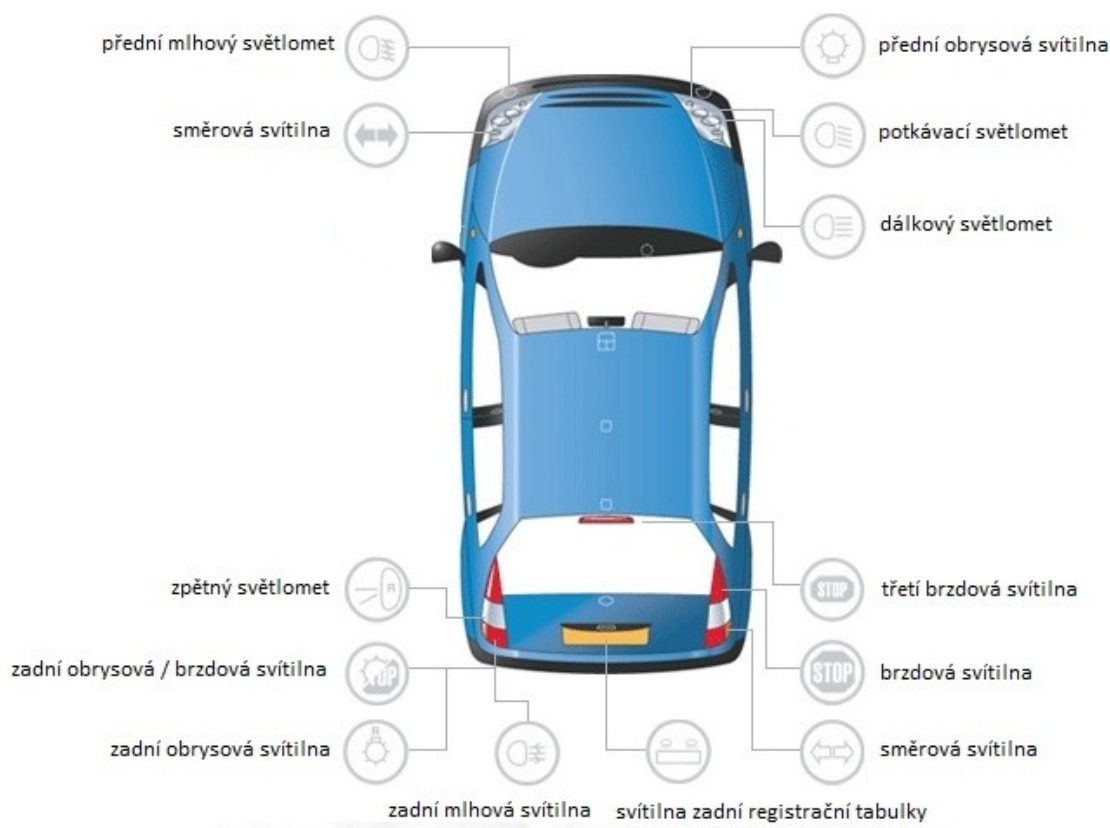
## **I      TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 POŽADAVKY NA AUTOMOBILOVÉ SVÍTILNY

Požadavků na automobilové svítilny je mnoho a často velmi specifických. V následujících kapitolách budou nejdříve stručně popsány funkce jednotlivých svítilen či světlometů (kapitola 1.1 *Všeobecné specifikace*) a dále budou jednotlivě uvedeny vybrané požadavky na některé z nich (kapitola 1.2. *Jednotlivé specifikace*). Většina následujících údajů bude čerpána z předpisů pro evropský provoz. V kapitolách věnujících se jednotlivým specifikacím budou vybírány pouze nejdůležitější z požadavků a také ty, které částečně souvisejí s praktickou částí práce. Nejvíce bude věnováno požadavkům na svítivost pro jednotlivé světlometry či svítilny.

## 1.1 VŠEOBECNÉ SPECIFIKACE

V této kapitole budou obecně popsány funkce vybraných osvětlovacích zařízení. Na následujícím obrázku je možno vidět tato vybraná osvětlovací zařízení orientačně zakreslena na schématu automobilu.



Obr. 1.1.1: Vybraná osvětlovací zařízení [I]

### ➤ Dálkový světlomet

Dálkový světlomet se užívá k osvětlování vozovky na velkou vzdálenost před vozidlem.

➤ **Potkávací světlomet**

Potkávací světlomet osvětluje vozovku před vozidlem, aniž by nepatřičně oslňoval nebo obtěžoval řidiče přijíždějící z opačného směru, nebo jiné uživatele vozovky.

➤ **Přední mlhový světlomet**

Cílem předního mlhového světlometu je zlepšení osvětlení vozovky před vozidlem za mlhy nebo podobných podmínek, které snižují viditelnost.

➤ **Zpětný světlomet**

Zpětný světlomet osvětluje vozovku za vozidlem a upozorňuje ostatní uživatele vozovky, že vozidlo couvá nebo bude couvat.

➤ **Směrová svítilna**

Směrová svítilna informuje ostatní uživatele silnice, že řidič chce změnit směr.

➤ **Výstražný signál nebezpečí**

Výstražný signál nebezpečí znamená současnou činnost všech směrových svítlen. Upozorňuje na zvláštní nebezpečí, které vozidlo dočasně vytváří pro ostatní uživatele vozovky.

➤ **Brzdová svítilna**

Účelem brzdové svítilny je upozornit ostatní uživatele vozovky za vozidlem, že se podélný pohyb vozidla záměrně zpomaluje.

➤ **Zařízení k osvětlení zadní registrační tabulky**

Zařízení k osvětlení zadní registrační tabulky slouží k osvětlení prostoru, určeného pro zadní registrační tabulku, které se může skládat z různých optických součástí.

➤ **Přední obrysová svítilna**

Přední obrysová svítilna je užívána k označení přítomnosti vozidla a zároveň podání informace o jeho šířce při pohledu zepředu.

➤ **Zadní obrysová svítilna**

Zadní obrysová svítilna je užívána k označení přítomnosti vozidla a zároveň k podání informace o jeho šířce při pohledu zezadu.

➤ **Zadní mlhová svítilna**

Účelem zadní mlhové svítilny je učinit vozidlo snadněji viditelné zezadu při husté mlze.

➤ **Parkovací svítilna**

Parkovací svítilna upozorňuje na stojící vozidlo v zastavěné oblasti, kdy nahrazuje přední a zadní obrysové svítilny.

➤ **Doplňková obrysová svítilna**

Doplňková obrysová svítilna se montuje co nejbližší k nejvzdálenějším vnějším šířkovým obrysům a co možno nejbližší k místu v největší výšce vozidla. Je určena ke zřetelnému označení jeho celkového rozměru. Tato svítilna doplňuje u určitých motorových

a přípojných vozidel přední a zadní obrysové svítilny vozidla tím, že zvlášť upozorňuje na jejich rozměr.

➤ **Denní svítilna**

Denní svítilna směřuje dopředu a činí vozidlo snadněji viditelné za jízdy ve dne. Nemusí však podávat informaci o jeho rozměrech jako v případě obrysových svítilen.

➤ **Rohový světlomet**

Rohový světlomet je doplňující osvětlení. Osvětluje tu část silnice, která je v blízkosti předního okraje vozidla na straně, na kterou se vozidlo bude stáčet. [1]

## **1.2 JEDNOTLIVÉ SPECIFIKACE**

Tato kapitola podrobněji popisuje vybrané typy světelných zařízení. Vybrané byly hlavní funkce, u nichž se již v částečné míře používají a pravděpodobně do budoucna budou používat více LED světelné zdroje. Mezi uváděné údaje patří vybrané technické požadavky, zobrazení měřicích bodů, jímž odpovídají tabulkové hodnoty svítivosti a předepsaná barva vyzařovaného světla. Zařízení ověřující tyto parametry se nazývá „goniofotometr“ a jeho funkce je popsána v kapitole č. 3.

### **1.2.1 Dálkový světlomet**

#### ***Obecné požadavky***

Světlomet, jehož montáž je pro každý automobil povinná (ve standardním počtu dvou světlometů), musí splňovat požadavek, že vyzařené světlo nebude obtěžovat řidiče (nikoliv řidiče protijedoucího automobilu, ale řidiče, jehož automobil využívá rozsvícených dálkových světlometů), a to ať už přímo nebo nepřímo (odrazem). Ovládání světlometů může být manuální i automatické. Způsob automatického ovládání může být použit pouze tehdy, když snímací systém je schopen detekovat následující vstupy:

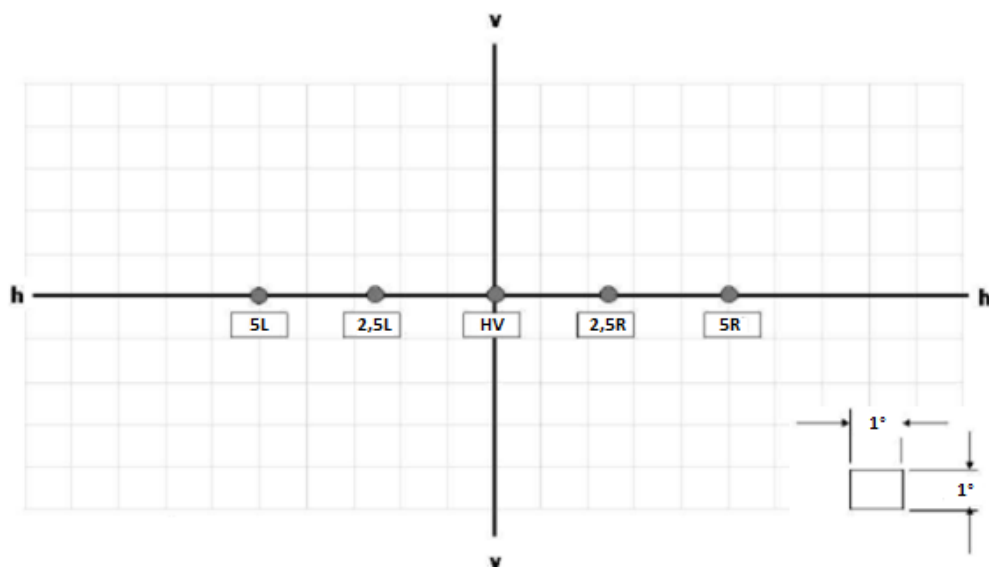
1. podmínky vnějšího osvětlení
2. světlo vyzařené předními světelnými zařízeními a přední světelnou signalizací vozidel jedoucích v protisměru
3. světlo vyzařené zadní světelnou signalizací vozidel jedoucích před vozidlem (je třeba brát také v úvahu jízdní kola apod.) [2]

#### ***Svítivost***

Jednotlivé zkušební body svítivosti dálkového světlometu se odvíjejí od následujícího grafu. Body, jež jsou zakresleny na ose „h“, označeny jako 5L, 2,5L, 2,5R a 5R, označují měřicí body promítnuté na stěně před vozidlem. V tomto případě číslo v jejich označení odpovídá úhlu [°], pod kterým je světlo vyzařované ze světlometu. V některých případech tomu tak být nemusí, např. v následující podkapitole *1.2.2 Potkávací světlomet*, kde se názvy měřicích bodů neshodují s úhlovými souřadnicemi. [2]

V průsečíku os „h” a „v” se nachází bod s označením „HV”, který musí být uvnitř izoluxy, která představuje 80% maximální svítivosti  $I_M$ . [2]

Maximální hodnota svítivosti  $I_M$  nesmí překročit hranici 215000 cd, a to ve kterémkoliv bodě (i mimo měřící body, nacházející se v následujícím grafu). [2]



Obr. 1.2.1.1: Měřící body – dálkový světlomet [II]

V návaznosti na graf nad tímto odstavcem musí dálkový světlomet z hlediska rozložení svítivosti na stěně (v předepsané vzdálenosti) splňovat požadavky uvedené v následující tabulce.

Tab. 1.2.1.1: Tabulka měřících bodů – dálkový světlomet [II]

		Světlomet třídy A	Světlomet třídy B
Zkušební bod	Úhlové souřadnice (°)	Požadovaná svítivost (cd)	Požadovaná svítivost (cd)
		Min	Min
$I_{max}$		27 000	40 500
H - 5L	0.0 , 5.0 L	3 400	5 100
H - 2.5L	0.0 , 2.5 L	13 500	20 300
H - 2.5 R	0.0 , 2.5 R	12 500	20 300
H - 5 R	0.0 , 5.0 R	3 400	5 100



Pozn.: Pro současně vyráběné světlomety platí hodnoty svítivosti uvedené ve sloupci „Světlomet třídy B“, hodnoty pro „Světlomet třídy A“ jsou platné pro světlomety vyráběné během platnosti dnes již neplatných vydání předpisů (výroba náhradních dílů). [2]

## Barva

Barva vyzařovaného světla musí být bílá. A to jak při měření po 1 minutě svícení, tak i po dosažení fotometrické stability, v obou případech musí změřené souřadnice odpovídat danému rozmezí trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$ .

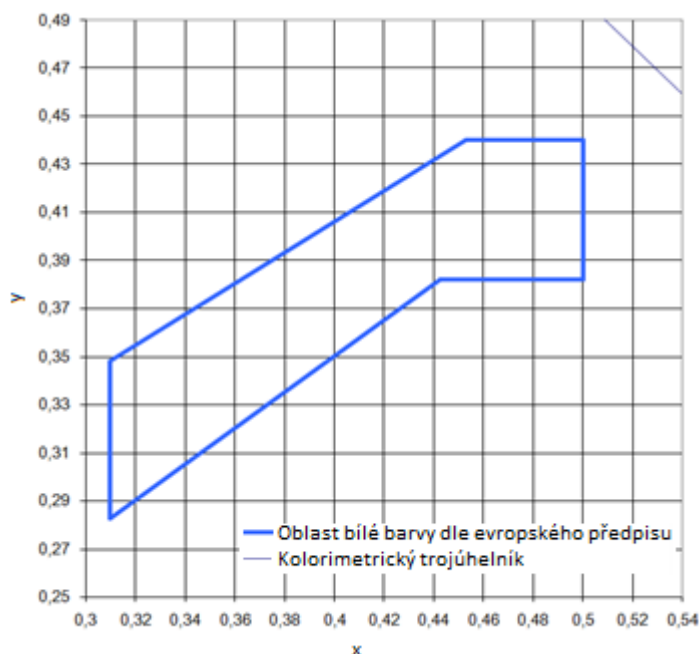
*Fotometrickou stabilitou se myslí stav světelného zdroje, kdy nedochází ke změnám světelných parametrů daného zdroje větším jak 3 % fotometrické hodnoty během doby 15 minut.* [1,2]

Veškeré barvy světla užívané v automobilovém průmyslu jsou určeny plochou, definovanou trichromatickými souřadnicemi  $x$ ,  $y$  v chromatickém diagramu (viz příloha č. 1). V souvislosti s tímto diagramem jsou předpisem č. 48 [1] definované oblasti daných barev světla, ve kterých se musí nacházet body dané naměřenými hodnotami trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$ .

Oblast barvy, ve které se má pohybovat barva vyzařovaného světla, je udaná spojnicemi bodů se souřadnicemi  $x$ ,  $y$  (viz Tab. 1.2.1.2).

Tab. 1.2.1.2: Souřadnice – bílá barva [1]

	$x$	$y$
$W_1$ :	0.310	0.348
$W_2$ :	0.453	0.440
$W_3$ :	0.500	0.440
$W_4$ :	0.500	0.382
$W_5$ :	0.443	0.382
$W_6$ :	0.310	0.283



Obr. 1.2.1.2: Oblast bílé barvy v kolorimetrickém trojúhelníku

Po zakreslení bodů  $W_1 - W_6$  do kartézské soustavy souřadnic a po jejich následném spojení vznikne oblast v kolorimetrickém trojúhelníku, ve které se musí nacházet body odpovídající naměřené bílé barvě světla (Obr.: 1.2.1.2).

### 1.2.2 Potkávací světlomet

#### Obecné požadavky

Potkávací světlometry jsou povinné pro automobily a naopak zakázané pro vozidla přípojná. Světlometry musí být vybaveny korektorem sklonu, a to buď automatickým, nebo ručním. Dále musí být navrženy tak, aby dodávaly dobré osvětlení bez oslnění protijedoucích vozidel. Je možné dovybavení potkávacího světlometu o doplňkový zdroj, který se aktivuje při vjezdu do zatáčky. [2]

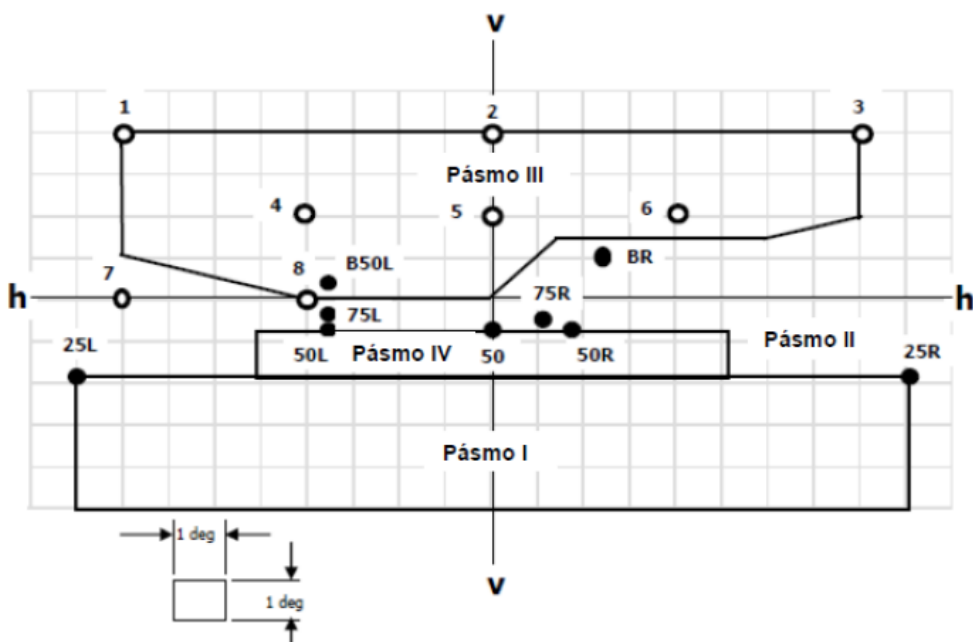
Ovládání potkávacího světlometu může být ruční nebo automatické. [2]

#### Svítivost

U světlometů s LED moduly nesmí být změřená hodnota svítivosti ve kterémkoliv měřicím bodě větší než 18500 cd. [2]

Jednotlivé zkušební body dálkového světlometu se odvíjejí od následujícího obrázku. Stejně jako v případě dálkového světlometu, tak i tomuto obrázku (plocha představující stěnu umístěnou naproti automobilu v určité vzdálenosti) náleží tabulka měřicích bodů. [2]

Pozn.: Před samotným měřením svítivosti je nutné provést přesné nastavení světlometu dle kritérií uvedených v předpisu č. 112 [2]. [2]



Obr. 1.2.2.1: Měřicí body – potkávací světlomet [II]

Jak již bylo podotknuto v popisu analogického grafu pro dálkový světloomet, některé popisy geometrických bodů neodpovídají úhlu [°] vyosení, např.: bod „75R“ (uvedený v následující tabulce). Úhlové souřadnice toho bodu jsou uvedeny ve druhém sloupci, tedy 0,57 stupně dolů od osy „H“ a 1,15 stupně vpravo od osy „V“.

Tab. 1.2.2.1: Tabulka měřících bodů – potkávací světloomet [II]

Světlometry pro pravostranný provoz (RHT) <u>**/</u>		Světlomet třídy A		Světlomet třídy B	
Označení zkušebního bodu	Úhlové souřadnice zkušebního bodu (°)	Požadovaná svítivost (cd)		Požadovaná svítivost (cd)	
		Max	Min	Max	Min
B 50 L	0.57U, 3.43L	350		350	
BR	1.0 U, 2.5 R	1 750		1 750	
75 R	0.57D, 1.15R		5 100		10 100
75 L	0.57D, 3.43L	10 600		10 600	
50 L	0.86D, 3.43L	13 200 ***/		13 200 ***/	
50 R	0.86D, 1.72R		5100		10100
50 V	0.86D, 0				5 100
25 L	1.72D, 9.0 L		1 250		1 700
25 R	1.72D, 9.0 R		1 250		1 700
Libovolný bod v pásmu III (ohraňčený následujícími souřadnicemi ve stupních) 8L 8L 8R 8R 6R 1.5R V-V 4L 1U 4U 4U 2U 1.5U 1.5U H-H H-H		625		625	
Libovolný bod v pásmu IV (0.86D až 1.72D, 5.15L až 5.15R)			1 700		2 500
Libovolný bod v pásmu I (1.72D až 4D, 9L až 9R)		17 600		< 21 <u>*/</u>	

Vysvětlení významu písmen: L, R ,U ,D a symbolů: \*/, \*\*/ a \*\*\*/:

Písmeno L znamená, že bod se nachází vlevo od osy „V“, písmeno R popisuje polohu bodu od téže osy vpravo.

Písmeno U znamená, že bod se nachází nahoře od osy „H“, písmeno D značí dolní polohu bodu od téže osy.

\*/ Je aktuálně změřená hodnota v bodech 50R / 50L.

\*\*/ Pro levostranný provoz je písmeno R nahrazeno písmenem L a naopak.

\*\*\*/ Označuje horní mez hodnoty změřené svítivosti tam, kde je použit LED modul s elektronickým ovladačem zdroje světla. Tato hodnota je 18500 cd. [2]

### Barva

Barva vyzařovaného světla musí být bílá, a to za stejných podmínek jako u dálkového světloometu. Souřadnice oblasti v kolorimetrickém trojúhelníku, do které musí barva

vyzařovaného světla spadat, jsou taktéž totožné s oblastí vymezenou pro dálkový světlomet (viz kapitola 1.2.1.). [1]

### 1.2.3 Přední mlhový světlomet

#### *Obecné požadavky*

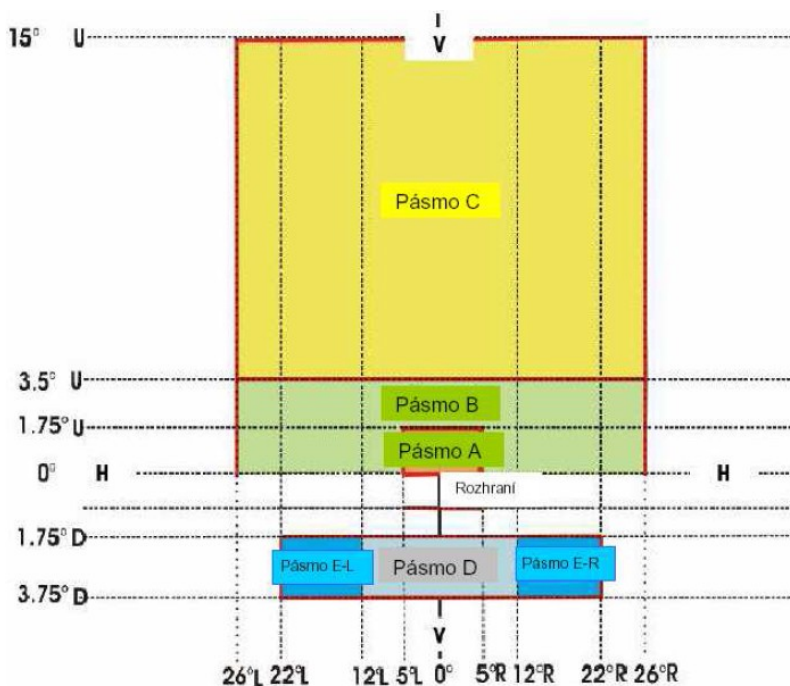
Montáž předního mlhového světlometu není pro automobily povinná. Konstrukcí těchto světlometů musí být zajištěno omezení oslňování protijedoucích vozidel. [3]

Následující informace jsou vztaženy ke světlometům třídy B. [3]

Mlhový světlomet musí být vybaven žárovkou, jejíž parametry uvádí předpis č. 37 [25], LED modulem nebo výbojkovým zdrojem světla. Světelný výstup těchto zdrojů nesmí být v rozporu s předpisem č. 99 [24] a č. 128 [26]. Světelný tok zdroje světla nesmí překročit hodnotu celkového skutečného světelného toku 2000 lm. [3]

#### *Svítivost*

Po nastavení světlometu dle předepsaného postupu musí výsledky měření splňovat hodnoty svítivosti v pásmech uvedených v následujícím grafu, dle Tab. 1.2.3.1. [3]



Obr. 1.2.3.1: Měřicí zóny – přední mlhový světlomet [IV]

Rozdíl mezi tímto grafem a grafy u dálkového a potkávacího světlometu je pouze v prostorové definici pásem oproti bodům.

Tab. 1.2.3.1: Tabulka měřených pásem – přední mlhový světlomet [IV]

Určené čáry nebo pásma	Svislá poloha */	Vodorovná poloha */	Svitivost	Vyhovět pro
Čára 1	15°U až 60°U	0°	145 cd max	celou čáru
Pásma A	0° až 1,75°U	5°L až 5°R	85 cd min	celé pásmo
Pásma B	0° až 3,5°U	26°L až 26°R	570 cd max	celé pásmo
Pásma C	3,5°U až 15°U	26°L až 26°R	360 cd max	celé pásmo
Pásma D	1,75°D až 3,5°D	12°L až 12°R	1700 cd min 11500 cd max	nejméně jeden bod na každé svislé čáře
Pásma E	1,75°D až 3,5°D	12°L až 22°L a 12°R až 22°R	810 cd min 11500 cd max	nejméně jeden bod na každé svislé čáře
*/ Souřadnice jsou určeny ve stupních pro úhlový systém se svislou polární osou.				

## Barva

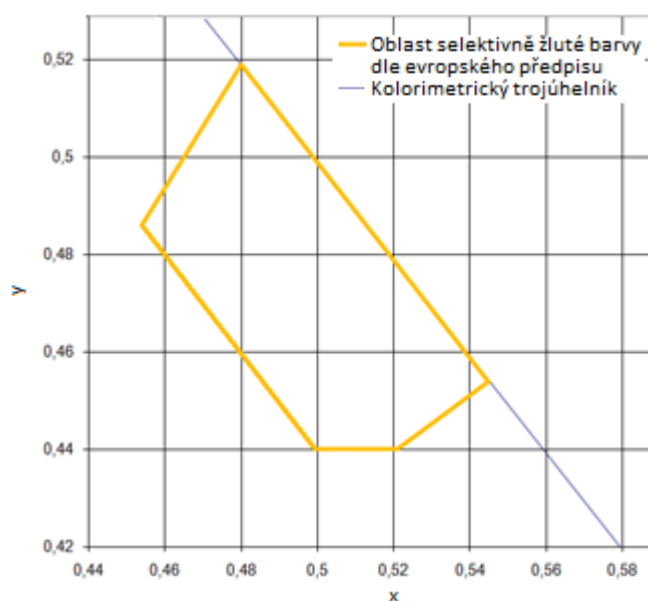
Pro tento typ světlometu je stanovena barva bílá nebo selektivní žlutá. Těchto barev je možno dosáhnout buď barvou zdroje světla, nebo krycím rozptylovým sklem, případně jiným vhodným způsobem. [3]

Definice bílé barvy uvedena v kapitole 1.2.1.

Selektivní žlutá barva je definována plochou v chromatickém diagramu, viz Obr. 1.2.3.2. Tato plocha vznikla spojením úseček SY<sub>1</sub> - SY<sub>5</sub> (stejně jako v případě bílé barvy, viz kapitola 1.2.1.). Souřadnice bodů definující zmíněné úsečky se nacházejí v následující tabulce.

Tab. 1.2.3.2: Souřadnice – selektivně žlutá [I]

	x	y
SY <sub>1</sub> :	0.454	0.486
SY <sub>2</sub> :	0.480	0.519
SY <sub>3</sub> :	0.545	0.454
SY <sub>4</sub> :	0.521	0.440
SY <sub>5</sub> :	0.500	0.440



Obr. 1.2.3.2: Oblast barvy selektivně žluté

### 1.2.4 Směrová svítidla

#### Obecné požadavky

Zdrojem této signální funkce může být zdroj světla schválený podle předpisu č. 37 [25] nebo č. 128 [26]. Tedy žárovky nebo LED světelné zdroje. [4]

Blikání může být vytvářeno postupnou aktivací světelných zdrojů, pokud jsou splněny následující podmínky (platí pro směrové svítidlo typu 1, 1a, 1b, 2a nebo 2b, kategorie jsou vysvětleny na obrázku v příloze č. 2):

- Po aktivaci daného světelného zdroje musí zůstat svítit, než skončí cyklus „ZAP“ (zapnuto).
- Aktivace zdrojů světla musí probíhat postupně od vnitřku po vnějšek přivrácené plochy.
- Blikání zdrojů světla musí působit jako spojitá linka (bez vln ve svislém směru).
- Po začátku cyklu „ZAP“ musí střídání skončit během časového intervalu 200 ms. [4]

#### Svítivost

Světlo vyzářené jedním ze dvou vzorků svítidel musí splňovat minimální a maximální hodnoty svítivosti uvedené v Tab. 1.2.4.1. [4]

Maximální hodnoty svítivosti pro soustavu dvou nebo více svítidel jsou dány násobkem koeficientu 1,4 a hodnoty svítivosti pro jednu ze svítidel uvedenou v Tab. 1.2.4.1 (neplatí pro kategorii 2a). [4]

Tab. 1.2.4.1: Tabulka kritérií svítivosti pro směrová svítidla

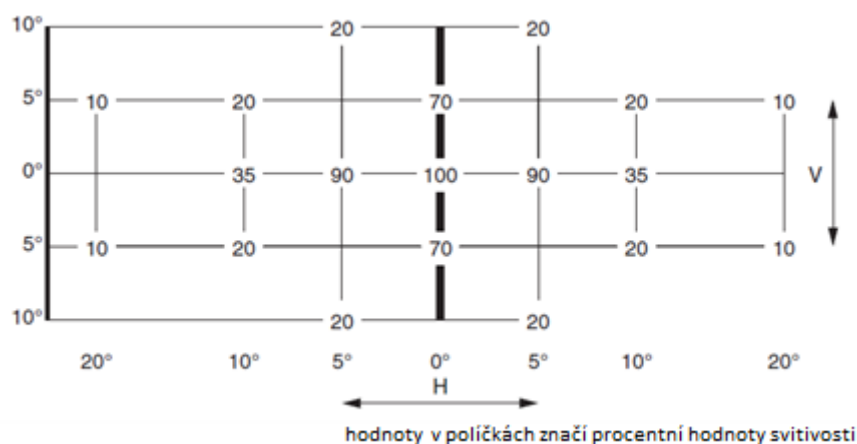
Směrová svítidla kategorie	Minimální svítivost cd	Maximální hodnoty svítivosti v cd při užití jako	
		jednotlivá svítidla	svítidla (jednotlivá) značená "D" (viz odst. 4.4.2.3)
1	175	1000	500
1a	250	1200	600
1b	400	1200	600
2a (stálá)	50	500	250
2b (proměnná)	50	1000	500
5	0,6	280	140
6	50	280	140

Pozn.: Rozřazení jednotlivých kategorií směrových svítidel je znázorněno na Obr. v příloze č. 2.

V předposledním sloupci tabulky jsou uvedeny maximální hodnoty svítivosti k „jednotlivé svítidlo D“. Za jednotlivou svítidlo značenou "D" se považuje svítidlo, jež je součástí soustavy, která je složena ze dvou svítidel stejné funkce. [4]

Jednotlivá svítidla musí splňovat minimální hodnotu svítivosti uvedenou ve druhém sloupci tabulky, a to i v případě, že je jedna ze svítílen porouchána. Maximální hodnoty svítivosti v předposledním sloupci tabulky představují hodnotu maximální přípustné svítivosti všech svítílen společně. [4]

V následujícím grafu prostorového rozložení světla pro směrové svítidlo jsou zakresleny procentní hodnoty svítivosti vztahované k minimálním svítivostem uvedených v Tab. 1.2.4.1.



Obr. 1.2.4.1: Graf prostorového rozložení světla [V]

Např. pro směrovou svítidlo kategorie „1b“ je stanovena minimální hodnota svítivosti v bodě „HV“ 400 cd (dle Tab. 1.2.4.1), v bodě „5U, 20L“ (5° nahoru od osy „V“, 20° doleva od osy „H“) pak bude minimální požadovaná hodnota svítivosti 40 cd.

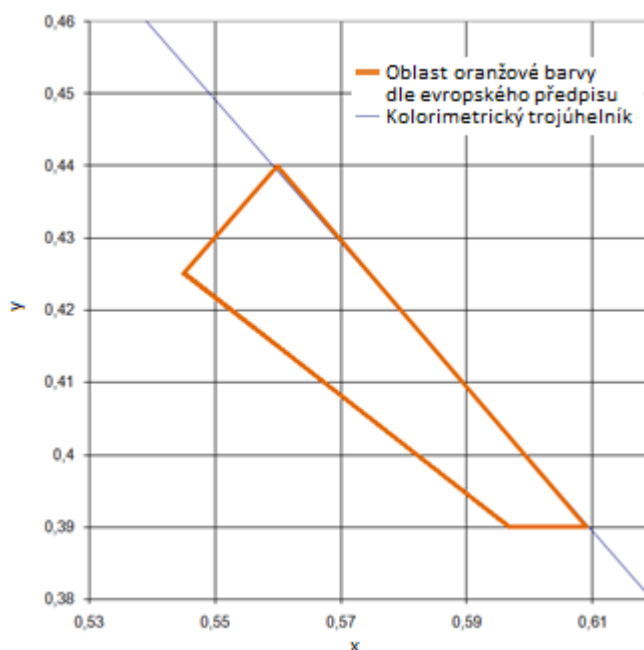
### Barva

Barva vyzařovaného světla směrovou svítidlo uvnitř pole v grafu prostorového rozložení světla musí být oranžová (tzn. v poli ohraničeném 10° nahoru i dolů od osy „V“ a 20° vlevo i vpravo od osy „H“). Vně uvedeného pole nesmí být pozorovatelné ostré změny barvy. [4]

Oranžová barva je definovaná plochou v chromatickém diagramu, viz Obr. 1.2.4.2. Tato plocha vznikla spojením bodů  $A_1$  -  $A_4$ . Souřadnice bodů, definující zmíněnou plochu, se nacházejí v Tab. 1.2.4.2.

Tab. 1.2.4.2: Souřadnice – oranžová [I]

	x	y
A <sub>1</sub> :	0.545	0.425
A <sub>2</sub> :	0.560	0.440
A <sub>3</sub> :	0.609	0.390
A <sub>4</sub> :	0.597	0.390



Obr. 1.2.4.2: Oblast oranžové barvy

## 1.2.5 Brzdové, přední a zadní obrysové svítlny

### Obecné požadavky

Zdrojem těchto světelných funkcí může být zdroj světla schválený podle předpisu č. 37 [25] nebo č. 128 [26]. Tedy žárovky nebo LED světelné zdroje. [5]

Obrysovou svítilnu je možné sloučit s jinou funkcí (např. brzdovou svítilnou), která využívá stejného zdroje světla. Takto sloučené svítilny musí využívat přídavný systém pro regulaci intenzity vyzařovaného světla. [5]

Pozn.: Zadní obrysové svítilny, které byly schváleny, se mohou považovat za schválené i jako doplňkové obrysové svítilny. Totéž platí i pro přední obrysové svítilny. [5]

### Svítivost

Světlo vyzařené jedním ze dvou vzorků svítilen musí splňovat minimální a maximální hodnoty svítivosti uvedené v Tab. 1.2.5.1. [5]

V případě sloučení zadní obrysové svítilny a brzdové svítilny má být poměr mezi skutečnými změřenými svítivostmi při současně zapnutých svítilnách nejméně 5:1. Oblast měření svítivosti pro určení tohoto poměru se nachází v grafu prostorového rozložení světla (viz Obr. 1.2.4.1) v obdélníkovém poli ohraničeném horizontálními přímkami, které procházejí body  $\pm 5^\circ$  na ose „V“ a vertikálními přímkami, které procházejí body  $\pm 10^\circ$  na ose „H“. [5]



Tab. 1.2.5.1: Tabulka kritérií svítivosti pro brzdové, přední a zadní obrysové svítilny [VI]

	Minimální svítivost v cd	Maximální hodnoty svítivosti v cd při užití jako	
		Jednotlivá svítilna	Jednotlivá svítilna označená "D" (odst. 4.2.2.6)
Přední obrysové svítilny, doplňkové přední obrysové svítilny A nebo AM	4	140	70
Přední obrysové svítilny sloučené se světlometem	4	140	-
Zadní obrysové svítilny, doplňkové zadní obrysové svítilny R, R1 nebo RM1 (konstantní)	4	17	8,5
R2 nebo RM2 (proměnná)	4	42	21
Brzdové svítilny S1 (konstantní)	60	260	130
S2 (proměnná)	60	730	365
S3 (konstantní)	25	110	55
S4 (proměnná)	25	160	80

Pozn.: Svítilna "D" je samostatná svítilna, kterou je povoleno montovat v páru (součet dvou musí tedy splňovat maximum svítivosti pro jednotlivou svítilnu). [5]

Svítivost v každém směru, která odpovídá grafu prostorového rozložení světla (viz *Obr. 1.2.4.1*), nesmí být menší než násobek minimální hodnoty svítivosti a koeficientu odpovídajícímu procentu stanovenému v grafu prostorového rozložení světla. [5]

Svítivost nesmí překročit maximum svítivosti, uvedené v *Tab. 1.2.5.1*, v žádném směru v prostoru, ve kterém je světelné zařízení viditelné. [5]

### **Barva**

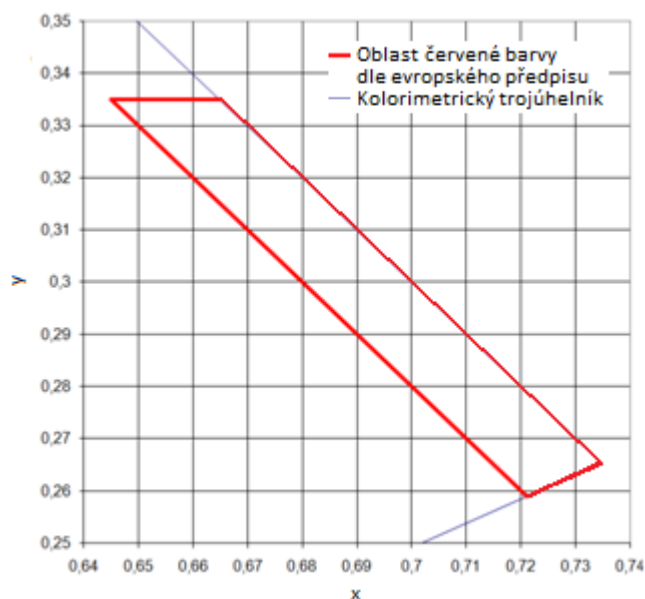
Barvy jednotlivých funkcí v poli grafu na *Obr. 1.2.4.1* musí být bílé nebo červené dle funkce. Mimo tuto mřížku nesmí dojít ke znatelným změnám barev. [5]

Definice bílé barvy je uvedena v *kapitole 1.2.1*.

Červená barva je definovaná plochou v chromatickém diagramu, viz *Obr. 1.2.1.2*. Tato plocha vznikla spojením bodů SY<sub>1</sub> - SY<sub>5</sub>. Souřadnice bodů se nacházejí v následující tabulce.

Tab. 1.2.5.2: Souřadnice – červená [I]

	x	y
R <sub>1</sub> :	0.645	0.335
R <sub>2</sub> :	0.665	0.335
R <sub>3</sub> :	0.735	0.265
R <sub>4</sub> :	0.721	0.259



Obr. 1.2.1.2: Oblast červené barvy

## 1.2.6 Zadní mlhová svítidla

### Obecné požadavky

Zdrojem těchto funkcí může být zdroj světla schválený podle předpisu č. 37 [25] nebo č. 128 [26]. Tedy žárovky nebo LED světelné zdroje. [6]

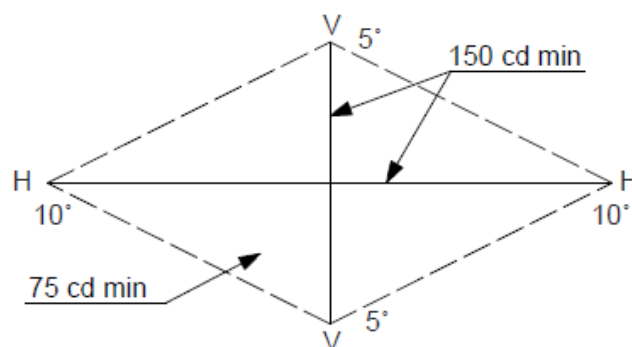
### Svítivost

Světlo vyzařené jedním ze dvou vzorků svítlen musí splňovat minimální a maximální hodnoty svítivosti uvedené v odstavci níže. [6]

Svítivost v oblasti na osách „H“ a „V“ v grafu prostorového rozložení světla (viz Obr. 1.2.6.1) danou stupni: 10° nalevo i napravo po horizontální ose „H“ a 5° dolů i nahoru po vertikální ose „V“, nesmí být menší než 150 cd. Mimo tyto přímky se v oblasti uvnitř zakresleného kosočtverce nesmí svítivost pohybovat pod hodnotou 75 cd. [6]

Svítivost v jakémkoliv úhlu, z něhož může být svítidla pozorována, nesmí překročit 300 cd na jednu svítidlo se stálou svítivostí. U svítlen s proměnlivou svítivostí tato hodnota nesmí překročit 840 cd. [6]

Zdánlivá plocha zdroje (ve směru vztažné osy), jež vyzařuje světlo, nesmí být větší než 140 cm<sup>2</sup>. [6]



Obr. 1.2.6.1: Kritérium svítivosti pro zadní mlhový světlomet [VII]

### **Barva**

V poli definovaném na Obr. 1.2.6.1 musí barva mlhového světlometu odpovídat barvě červené. Mimo toto pole nesmí dojít ke znatelným změnám barvy. [6]

Definice červené barvy viz kapitola 1.2.5. [6]

### **1.2.7 Denní svítilna**

#### **Obecné požadavky**

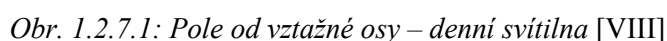
Denní svítilnu je možné sloučit s jinou funkcí (např. přední obrysovou svítilnou), která využívá stejného zdroje světla. Takto sloučené světlomety musí využívat přídavný systém pro regulaci intenzity vyzařovaného světla. [7]

Zdrojem těchto funkcí může být zdroj světla schválený podle předpisu č. 37 [25] nebo č. 128 [26]. Tedy žárovky nebo LED světelné zdroje. [7]

V případě poruchy jednoho z několika zdrojů (v rámci jedné svítilny) musí denní svítilna přesto splňovat stanovenou minimální svítivost. [7]

#### **Svítivost**

Svítivost jedné denní svítilny nesmí být ve vztahné ose (znázornění na Obr. 1.2.7.1) menší než 400 cd a zároveň v jakémkoliv bodě nacházejícím se v pásmu ohraničeném úhly 20° vlevo i vpravo od vertikální osy a 10° nahoru a 5° dolů od horizontální osy nesmí být hodnota svítivosti menší než 1 cd. [7]



Zároveň nesmí být překročena hodnota svítivosti v jakémkoliv směru 1200 cd. [7]



Definice bílé barvy je uvedena v kapitole 1.2.1.

## 2 SVĚTELNÉ ZDROJE VHODNÉ PRO AUTOMOBILOVÉ OSVĚTLENÍ SE ZAMĚŘENÍM NA LED

V této kapitole budou probrány současně používané světelné zdroje v automobilovém průmyslu, jejich členění a srovnání. Vzhledem k zaměření této práce bude více věnováno LED světelným zdrojům.

V podkapitolách bude také zmíněn vývojový trend světelných zdrojů, začínající vývojem v minulém století po současnost. Opět nejrozsáhlejší podkapitolou budou trendy týkající se LED světelných zdrojů, počínaje jejich využitím v interiérech, zadních brzdových svítlích až po využití v hlavních funkcích, tedy v předních světlometech a denních svítlích.

### 2.1 HALOGENOVÉ ŽÁROVKY

#### *Obecný popis, využití a vývoj*



Obr. 2.1.1: H7 [III]

Halogenové žárovky se v automobilovém průmyslu u hlavních funkcí používají již od počátku druhé poloviny 20. století. Přestože se halogenové žárovky vyrábí po tak dlouhou dobu, a to bez výraznější inovace, stále se pro ně nachází uplatnění, zejména u automobilů nižší třídy. Nejčastějším důvodem jejich využití je nepochybně výhodnost, kterou určuje nejen cena žárovky samotné, ale také nepotřebnost okolních zařízení, ať už startovacího modulu nebo řídicí elektroniky (viz LED a xenonové výbojky). Jejich další výhody jsou nejlepší kvalita světla

a výborná reprodukce barev. Nevýhodou je nízká účinnost a životnost. [8, 11]

Halogenových žárovek je mnoho typů, nejpoužívanější jsou však s označením: H7, H4, H1 (hlavní funkce), H3 (mlhové světlomety), P27, PY27 (signální funkce) a nový typ H15, který vznikl v nedávné době s cílem zjednodušit její výměnu pomocí inovativní plastové "zaklapávací" patice. Toto řešení zefektivňuje výrobu světlometů, jež umožňuje automatizovat montáž žárovek a zjednodušit výrobu, tím ji i zlevňuje. Typ halogenové žárovky H15 je možné použít díky dvěma vláknům (obdobně jako typ H4) pro tyto různé světelné funkce: dálkový světlomet, potkávací světlomet, denní svícení a parkovací či poziční svítilnu. [8]

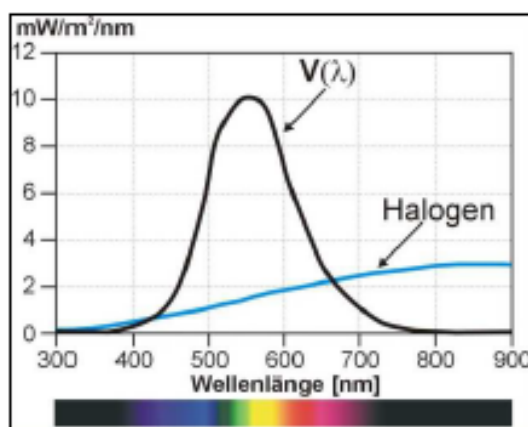
#### *Princip funkce*

U běžných žárovek se jedná o žhavení wolframového vlákna ve skleněné baňce upevněné na příslušné patici (odlišné dle typu). V baňce se nejdříve vyskytovalo vakuum, ve kterém docházelo k menší emisi materiálu vlákna. V dnešní době se plní směsí argonu a dusíku, případně kryptonem. [9]

Na rozdíl od běžných žárovek se u halogenových žárovek používá k vyplnění baňky plyn s příměsí halových prvků (zejména plyn metylen bromid a halový prvek brom). Baňka je tvořena křemičitým sklem, které je náchylné k destrukci při znečištění. Halogenové žárovky jsou také náchylné na změny velikosti pracovního napětí. [9]

### Spektrum záření

Na následujícím grafu můžeme vidět množství světla vyzážené halogenovou žárovkou do dané části spektra záření. Na *Obr. 2.4.1* je pak spektrální charakteristika srovnána s charakteristikami dále zmíněných světelných zdrojů.



*Obr. 2.1.2: Spektrum záření halogenové žárovky [III]*

## 2.2 XENONOVÉ VÝBOJKY

### Obecný popis, využití a vývoj



HID (Xenon) D2S

*Obr. 2.2.1: Xenonová výbojka [III]*

Xenonové výbojky se v automobilovém průmyslu objevují od roku 1992, kdy byla vyvinuta xenonová výbojka první generace. V roce 1999 přicházejí první Bi-Xenonové sériově vyráběné světlomety. Xenonové výbojky poskytují velké množství světla, tedy velmi intenzivní osvětlení vozovky. Xenonové výbojky nacházejí své uplatnění hlavně ve dražších vozech nebo jsou nabízeny jako příplatková výbava. Tato skutečnost napovídá, že se již nejedná o levný světelný zdroj, což je jeho značnou nevýhodou. [10, 11]

Např. xenonové výbojky XENARC od výrobce OSRAM jsou schválené pro použití pouze v automaticky seřizovaných světlometech (systém AFS), také musí tyto světlomety disponovat speciálním čistícím systémem vnějšího krycího skla a navíc výměnu samotné výbojky nebo předřadníku smí provádět pouze kvalifikovaná osoba. [10]

Jedná se tedy o mnohonásobně dražší osvětlovací systém (nutno brát v úvahu elektronický předřadník a v případě užití xenonové výbojky s nutností montáže čistících systémů také tato zařízení) než, v předchozí kapitole uvedené, halogenové žárovky.

Výhodami (vedle již zmíněného intenzivního osvětlení vozovky) jsou také vysoká účinnost a relativně dlouhá životnost. [9]

Nejpoužívanější typy xenonových výbojek jsou výbojky s označením D1R/S, D2R/S, D3R/S, D4R/S. Písmena R a S v označení jednotlivých typů vyznačují, zda se jedná o projekční světlomety (S) nebo reflektorové světlomety (R). [9]

Typy D1 a D2 obsahují prvky rtuti a typ D1 má na rozdíl od typu D2 zabudovaný startér. Oba typy pracují při napětí 85 V. [9]

U typů D3 a D4 jsou prvky rtuti, především z důvodu trendu ekonomičtější výroby, nahrazeny jiným prvkem (sloučenina  $\text{ZnI}_2$  – Jodit zinečnatý). Pracují se sníženým napětím 42 V a jejich nevýhodou vůči typům s prvky rtuti je pomalejší náběh světelného výkonu. [9]

### ***Princip funkce***

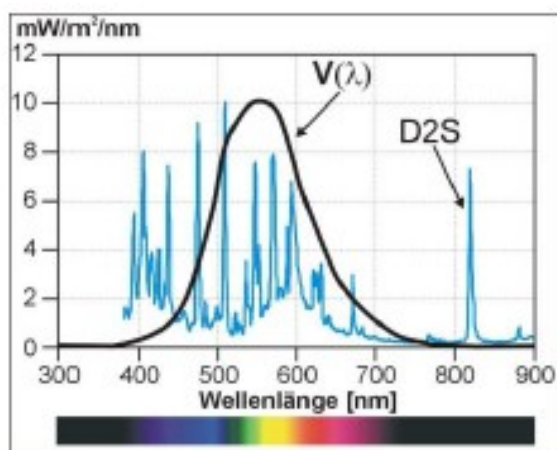
Výbojky jsou světelným zdrojem, u něhož světlo vzniká výbojem mezi dvěma elektrodami. Elektrody jsou umístěné v baňce ze skla a jsou naplněny parami kovů (rtuť) nebo vzácným plynem (xenon). Elektrody se rozlišují na studené nebo žhavené. Žhavením budícím proudem dochází k emitaci elektronů a následné ionizaci plynů v okolí elektrod. Vysokonapěťový impuls způsobí vybuzení výboje a dojde k rozzáření plynu a vzniku monochromatického světla. [9]

V automobilovém průmyslu využívané xenonové výbojky jsou tvořeny baňkou z křemičitého skla, která je naplněna xenonem s příměsí metalických solí. V baňce jsou elektrody z wolframu, které jsou od sebe vzdáleny 4,2 mm. Za studeného stavu je v trubici tlak okolo 700 kPa, považujeme je tedy za vysokotlaké. S nárůstem teploty na teplotu provozní může však tlak vzrůst až na desetinásobek. Během teplotního nárůstu dochází ve výboji, který nejprve probíhá v parách xenonu, ke zvýšení koncentrace halogenidů. Po několika vteřinách dojde k teplotnímu ustálení výbojky na teplotě okolo 700 °C. [9]

Při pracovní teplotě hořáku dochází v oblasti jeho osy ke štěpení halogenidů na atomy halogenu a příslušného kovu, které se vybudí a září. K jejich slučování na původní sloučeniny dochází vlivem vytváření gradientu koncentrace atomů, které pronikají ke stěnám hořáku o nižší teplotě. Tímto vzniká nezbytný uzavřený cyklus. [9]

### ***Spektrum záření***

Na grafu (viz Obr. 2.2.2) můžeme vidět křivku vyzářeného světelného výkonu v závislosti na vlnové délce záření xenonové výbojky.



Obr. 2.2.2: Spektrum záření xenonové výbojky [III]

## 2.3 LED - SVĚTELNÉ DIODY

### Obecný popis, využití a vývoj



Obr. 2.3.1: LED [III]

LED světelné zdroje jsou jak pro současný, tak i budoucí vývoj světelných zdrojů v automobilovém průmyslu nepochybně nejperspektivnějším zdrojem. Jejich hlavními výhodami jsou spolehlivost, dlouhá životnost, vysoká účinnost a rozmanité možnosti pro designéry. Přesto se začaly používat až v posledních letech, a to vzhledem k jejich nedostatečnému výkonu a ceně. Dříve byly LED využívány především pro osvětlení přístrojových desek, později pro třetí brzdomové svítilny (především kvůli jejich bezkonkurenčně nejrychlejšímu náběhu), následně LED nacházely využití ve směrových svítilnách a v roce 2007 byl firmou Hella Autotechnik zkonstruován první sériově vyráběný přední světlomet. [8,11]

### Princip funkce

LED diodu tvoří přechod P-N. Aby vznikla emise světla, musí přechodem P-N protékat proud v propustném směru. Přechodem vyzařované světlo je nekoherentní s úzkým spektrem, může také vyzařovat i jiné záření, zejména z oblasti spektra pro lidské oko neviditelné. Tento jev je způsoben elektroluminiscencí. Od chemického složení polovodiče se odvíjí pásmo spektra vyzařování, které může být téměř libovolné (od téměř ultrafialového až po infračervené). [9]

Principem LED je dáno, že nemohou vyzařovat přímo bílé světlo. Proto se dříve užívalo uspořádání třech čipů RGB a vlivem následného aditivního míšení v rozptylovém materiálu vrchlíku vzniklo světlo okem vnímané jako bílé. Další možností dosažení bílého světla je použití luminoforu naneseného na čipu LED, který přetransformuje část vycházejícího modrého světla z LED na světlo žluté barvy a výsledkem je bílá barva světla. Mimo zmíněné



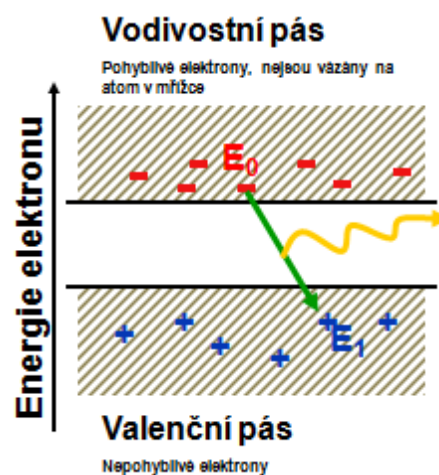
transformované modré světlo vycházející z LED, je možné také transformovat ultrafialové záření na bílou barvu světla opět pomocí luminoforu. [9]

- Spontánní emise světla v polovodiči

Spontánní emise světla vzniká při rekombinaci párů elektron - díra, když je dioda zapojena v propustném směru a dochází k injekci volných elektronů z oblasti N a injekci děr z oblasti P do oblasti P-N přechodu. Následně vzniká úzké emisní spektrum, kolem dominantní vlnové délky dané šířkou zakázaného pásu. Dominantní vlnovou délku je možné ovlivnit dopanty (koncentrací a chemickým složením polovodiče), čímž vznikne izolovaná hladina v zakázaném pásu. [17]

Na obrázku v textu je znázorněna struktura energetických hladin polovodičového krystalu a emise světla. Rekombinace volného elektronu a díry může být buď zářivá (zánik páru => vznik fotonu), tj. spontánní emise, nebo nezářivá, při které dochází k vibraci mřížky. [17]

Energie vyzářeného fotonu je úměrná šířce zakázaného pásu neboli rozdílu energií vodivostního a valenčního pásu  $E_0$  a  $E_1$  (viz Obr. 2.3.2);



Obr. 2.3.2: Emise fotonu LED [XIII]

$$E_0 - E_1 = E_{\text{fotonu}} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \text{ [eV]}, \quad (1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $f$  je frekvence záření,  $c$  je rychlost světla a  $\lambda$  je vlnová délka. [17]

Při rekombinaci platí následující podmínka zachování hybnosti:

$$p_{el1} \approx p_{\text{foton}} + p_{el2}, \quad (2)$$

kde  $p_{el1}$  označuje hybnost elektronu ve valenčním pásu a  $p_{el2}$  hybnost elektronu v pásu vodivostním. [17]

Toto je možné pouze u tzv. přímých polovodičů. Pokud je rozdíl hybností elektronů a děr velký, nedochází k emisi světla, rekombinace je nezářivá. Tak je to u většiny krystalů bez příměsí. Příměsí (dopanty) zvyšují pravděpodobnost emise světla. [17]

- Dělení LED dle materiálů
  - AlInGaP (Aluminium Indium Gallium Phosphide)

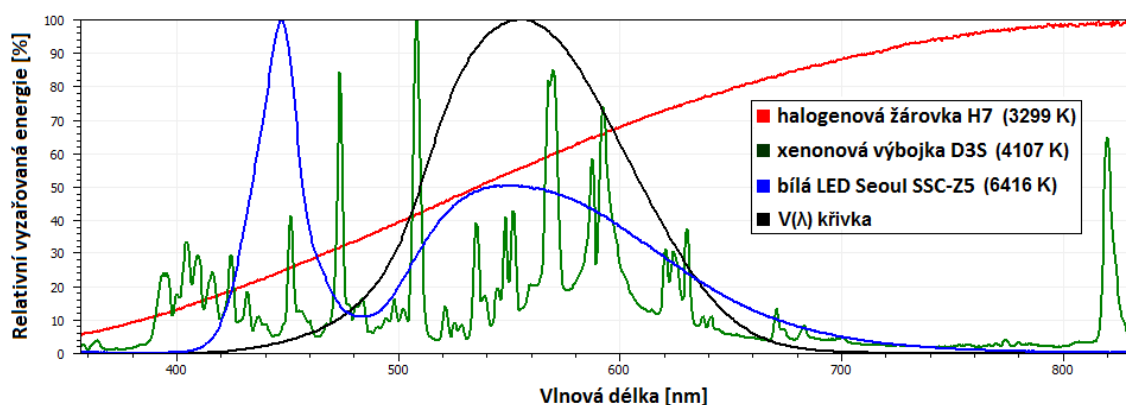
- Užívaná zejména u starších technologií, charakteristickým rysem je úzký zakázaný pás, díky čemuž není možná emise modré barvy (krátkých vlnových délek).
  - Dostupné barvy se odvíjejí od procenta zastoupení jednotlivých prvků v materiálu. Je možné získat tyto barvy: zelenou, oranžovou, žlutou a červenou.
  - V automobilovém průmyslu nacházejí využití u signálních funkcí a jejich hlavní nevýhodou (spolu se spektrálním omezením) je vyšší pokles světelného toku s narůstající teplotou. [17]
- InGaN (Indium Gallium Nitride)
- Novější technologie, která je stále ve vývoji, se kterým roste také světelný výstup.
  - Tato technologie přinesla do automobilového průmyslu svou barevnou variabilitou možnosti využití LED pro hlavní funkce. Dostupnými barvami jsou modrá (základem pro vytvoření bílé barvy pomocí konverze luminoforem), zelená a oranžová.
  - V automobilovém průmyslu se využívají pro tyto funkce: denní svícení, směrové svítilny a hlavní funkce. [17]

Spektrum bílé LED ve srovnání s halogenovou žárovkou a xenonovou výbojkou je zobrazeno na Obr. 2.4.1.

## 2.4 SROVNÁNÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

### *Srovnání dle spekter*

Na Obr. 2.4.1 se nacházejí spektra srovnávaných světelných zdrojů změřených spektrofotometrem Instruments Systems CAS 140CT.






Obr. 2.4.1: Srovnání spekter světelných zdrojů

### ***Srovnání dle parametrů***

V následující tabulce se nacházejí údaje získané z katalogů a údajů od výrobců světelných zdrojů. Mimo parametry uvedené v tabulce je vhodné srovnat uvedené zdroje z pohledu velikosti, kde jednoznačně vynikají LED, oproti srovnatelně velkým halogenovým a xenonovým výbojkám. Výhoda není pouze ve velikosti samotné, ale hlavně v možnosti jejich libovolného uspořádání.

*Tab. 2.4.1: Srovnání světelných zdrojů [23,11]*

Světelný zdroj	Halogenová žárovka	Xenonová výbojka	LED
			
Světelný tok [lm]	20-1900	~ 3200	5 - 400
Účinnost [lm/W]	~ 5 - 30	~ 55 - 145	~ 20 - 140
Teplota chromatičnosti [K]	~ 3200 - 4200	~ 3000 - 5500	~ 6000
Svítivost [Mcd/m <sup>2</sup> ]	20 - 30	~ 90	~ 25
Životnost [h]	300 - 1500	~ 3000	~ 10000 - 20000
Ra	> 95	~ 80	70 - 90
Rychlost náběhu [ms]	~ 300	40 - 60	téměř 0
Stmívání	plné	nelze	omezené

V příloze č. 3 se nachází také grafické srovnání světelných zdrojů, na němž jsou zachyceny jejich reálné světelné výstupy a umístění trichromatických souřadnic v kolorimetrickém trojúhelníku.

### 3 MOŽNOSTI MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK AUTOMOBILOVÝCH SVÍTILEN

Světlomety je nutné podrobit mnoha zkouškám, musí vyhovět z pohledu kvality a bezpečnosti náročným kritériím, potom následují homologace. K těmto zkouškám se řadí zatěžovací testy, testy teplotní, mechanické a chemické odolnosti, testy odolnosti vůči vniku prachu a vody, vůči působení slunečního záření a pro tuto kapitolu stěžejní zkoušky fotometrické a kolorimetrické.

Fotometrické zkoušky můžeme rozdělit na zkoušky typové a prototypové, první zmíněné budou předmětem této kapitoly, prototypové zkoušky se budou týkat praktické části práce. Mezi prototypové zkoušky jsou řazeny zkoušky určené k odhalení možných vad na daných součástech světlometů či svítilem, popřípadě jakékoliv zkoušky týkající se vývoje světlometů z pohledu optiky.

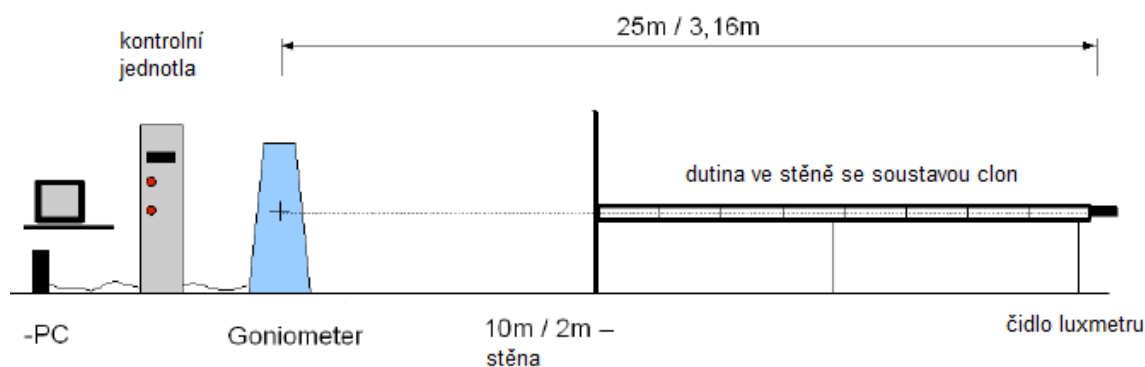
Typové fotometrické zkoušky jsou prováděny pomocí goniofotometrů (ověřování svítivosti v předepsaných bodech) a kolorimetrů (ověřování barvy vyzařovaného světla).

#### ***Goniofotometr***

Je to zařízení určené pro měření úhlové závislosti svítivosti světelných zdrojů [19]. Skládá se z mechanického zařízení, které zajišťuje pohyb světelného zdroje (světlometu) v potřebných směrech, z fotočlánku (luxmetru) a z elektroniky, která zpracovává a vyhodnocuje výstupní data z luxmetru. Princip luxmetru je popsán v kapitole 4.1. Minimální vzdálenost mezi fotočlánkem a světelným zdrojem musí odpovídat podmínce o bodovém zdroji, v automobilovém průmyslu jsou však pro čidlo luxmetru předpisem definované vzdálenosti 3,16 a 25 m. [18]

Jsou tři typy goniofotometrů. Prvním je sestava s otáčeným zdrojem světla a pevným čidlem luxmetru (tento typ je využíván v automobilovém průmyslu). Dalším druhem je goniofotometr s pevně uchyceným zdrojem světla, pevným čidlem luxmetru a otočným zrcadlem. A třetím typem je goniofotometr s otočným čidlem luxmetru a napevno uchyceným zdrojem světla. [18]

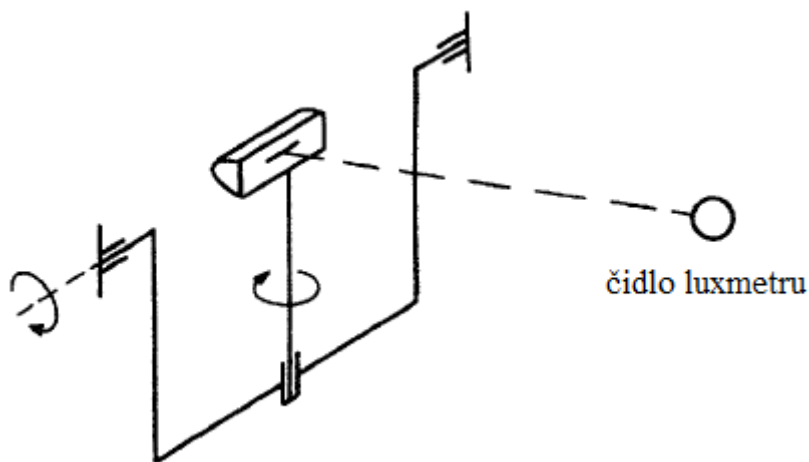
Na následujícím obrázku je znázorněno uspořádání měřicí místnosti s goniofotometrem s pevným čidlem luxmetru a natáčeným zdrojem světla.



Obr. 3.1: Uspořádání goniofotometru [III]

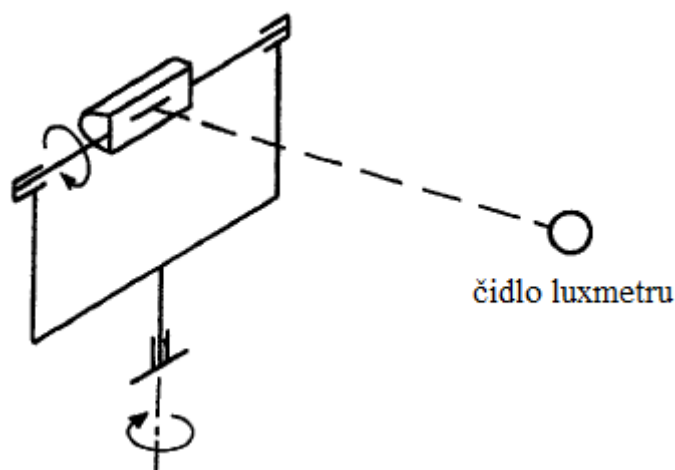
Znázorněné vzdálenosti mezi čidlem luxmetru a zdrojem světla (25 a 3,16 m) jsou udávány předpisy pro jednotlivé druhy světlometů či svítlen (kratší vzdálenost je zpravidla využívána pro signální funkce). Vzhledem k možnosti otočení světelného zdroje o  $180^\circ$  po horizontální ose by bylo zbytečné využití dvou místností se dvěma goniofotometry, a proto se zpravidla využívá sestavy se dvěma čidly luxmetru vzdálenými na jednu stranu od natáčecího mechanismu 3,16 m a na stranu druhou 25 m. [19]

Tento typ goniofotometru se dále rozděluje na typ A (zafixovaná horizontální osa a pohyblivá osa k ní kolmá):



Obr. 3.2: Goniofotometr s pevným čidlem luxmetru – typ A [XVI]

a typ B (zafixovaná vertikální osa a pohyblivá horizontální osa) [19]:



Obr. 3.3: Goniofotometr s pevným čidlem luxmetru – typ B [XVI]

„Centrem“ goniofotometru je průsečík tří os (horizontální, vertikální a vodorovná osa směřující ze středu čidla luxmetru), toto místo je také optickou osou a jeho pozice se musí shodovat se styčným bodem uchyceného svítidla nebo světlometu. Přesné umístění měřeného vzorku je zajištěno pomocí laserů umístěných v daných osách. [11]

### **Kolorimetr**

Kolorimetr je zařízení určující barevné vlastnosti (chromatičnost) světla. Je to pasivní přístroj, jenž snímá fotony skrze fotočlánky, které jsou opatřeny filtry s odlišnou citlivostí (modrý, zelený a červený). Tento přístroj detekuje záření subjektivně (tj. s lidským okem jako čidlem záření) a pouze srovnává, jestli bylo dosaženo stejné chromatičnosti u srovnávacího standardu (filtru) a hodnoceného vzorku. [20, 21]

Po změření vzorku (světlometu), při definovaných podmínkách (čas měření, vzdálenost mezi kolorimetrem a styčným bodem světlometu), dojde k odečtení trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$  a jejich následnému vyhodnocení. Vyhodnocení spočívá v zařazení naměřených trichromatických souřadnic do předpisem definované oblasti (viz kapitola *Požadavky na automobilové svítilny*) a posouzení, zda barva vyzařovaného světla tomuto předpisu vyhovuje či nikoliv.

## **II PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 NÁVRH METODIK MĚŘENÍ LED

Cílem praktické části této práce je nastínění měřicích metod zejména prototypovými zkouškami v LED laboratoři. Cílem těchto zkoušek je zjištění možných závad na prototypových světloometech, získání požadovaných charakteristik a popřípadě ověření parametrů udávaných výrobcí světelných zdrojů.

Vybrané druhy měření a jejich metodiky byly zvoleny s ohledem na jejich současné využití v LED laboratoři ve firmě Hella Autotechnik s.r.o. v Mohelnici.

Mezi nejčastěji prováděná měření patří ověřování barvy světla LED. Tato měření jsou prováděna na nezabudovaných a posléze na zabudovaných PCB ve světlometu. Je tedy provedeno měření barvy samotného světelného zdroje bez vlivu krycího skla a je ověřen jeho vliv na výslednou barvu vycházející z kompletního světlometu. Tímto způsobem je možno odhalit příčinu nevyhovujících výsledků měření barvy světla typovými zkouškami.

Obdobnou metodikou jsou ověřovány fotometrické parametry i při dalších měřeních, mezi které patří měření poklesu světelného toku s teplotou, závislosti fotometrických veličin na úhlu natočení LED, tzv. měření za studena, na jehož základě výrobci řadí jednotlivé LED do binů, a měření jasovým analyzátozem. Podrobnější analýza jednotlivých metodik měření bude provedena v následujících kapitolách.

### 4.1 MĚŘENÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH VELIČIN

Tato podkapitola předchází kapitolám, které se věnují již konkrétním měřením, a bude popisovat principy funkce dále použitých měřicích přístrojů.

#### *Kulový integrátor*

Zařízení sloužící k měření světelného toku svítidel a světelných zdrojů. Kulový integrátor má tvar duté koule, která je zevnitř natřena normovanou skladbou nátěrů pro dosažení vysoké odrazivosti a spektrální nezávislosti povrchu. Uvnitř koule je malé okénko s fotočlánkem, které zakrývá clonka. Místo fotočlánku je možné použít spektrofotometr, fotočlánek je tedy nahrazen světlovodným vláknem. Dalším článkem je clonka sloužící k zamezení přímému dopadu paprsku na fotočlánek. Velikosti kulových integrátorů jsou různé, od několika centimetrů (měření malých světelných zdrojů, např. LED) do tří metrů. Dalším důležitým prvkem kulového integrátoru je korekční žárovka, která slouží k eliminaci chyb měření vzniklých pohlcováním světla neaktivními plochami světelného zdroje. [12]

#### *Spektrofotometr*

Je to přístroj určený k měření spektra optického záření na principu rozkladu světla na hranolu nebo mřížce. Dle způsobu rozkladu světla se pak spektrofotometry rozdělují na mřížkové a hranolové. Spektrofotometrem můžeme vyhodnocovat např. spektrální složení dopadajícího záření, jas, osvětlenost, trichromatické souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $u$ ,  $v$ , teplotu



chromatičnosti, dominantní vlnovou délku, index podání barev, sytost, světelný tok (použití kulového integrátoru), osvětlenost (použití čidla luxmetru). [12]

Na následujícím obrázku můžeme vidět mřížkový spektrofotometr a jeho vnitřní uspořádání zrcadel.



*Obr. 4.1.1: Spektrofotometr IS CAS 140CT*

[XI]

### **Luxmetr**

Luxmetr je přístroj na měření osvětlenosti. Dle tvaru čidla luxmetru se rozdělují na rovinné, kulové, válcové, poloválkové aj. Pokud není uvedeno jinak, pod pojmem luxmetr se myslí přístroj pro měření rovinné osvětlenosti. Snímací úhel luxmetru pro měření rovinné osvětlenosti má být ve všech rovinách kolmý k rovině, ve které se určuje osvětlenost. Luxmetr je vybaven  $V(\lambda)$  filtrem pro přizpůsobení spektrální citlivosti lidskému zraku. Dalším vybavením je také difúzní nástavec, který slouží ke korekci směrové chyby fotodetektoru. [12]

### **Jasový analyzátor**

Jasový analyzátor je v podstatě digitální fotoaparát s optickou či softwarovou úpravou citlivosti dle křivky citlivosti lidského zraku  $V(\lambda)$ . Klasický jasoměr funguje jako luxmetr doplněný o optiku, která vymezuje kolmý dopad světla na čidlo luxmetru v definovaném prostorovém úhlu, ve kterém je integrován snímaný jas. Jasový analyzátor však umožňuje snímat jasové mapy s rozlišovací schopností danou prostorovým úhlem snímaným jedním pixelem (makropixelem). K navýšení dynamického rozsahu snímaných jasových map je využíváno softwarového překrývání několika totožných snímků pořízených při různých expozicích. Jasy se vyhodnocují pomocí programu, např. LMK Labsoft. [12]

## 4.2 MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH VELIČIN KULOVÝM INTEGRÁTOREM PO TEPLOTNÍM USTÁLENÍ

Tímto měřením se nejčastěji vyhodnocuje světelný tok a trichromatické souřadnice  $x$ ,  $y$ . Kromě těchto dvou základních veličin (pro automobilový průmysl) je možno odečíst také teplotu chromatičnosti  $T_c$ , polohu maxima vlnové délky, centrální vlnovou délku, dominantní vlnovou délku a sytost.

Měření jsou realizována pomocí kulového integrátoru, a to buď příkladacím kulovým integrátorem o průměru 7,5 cm, nebo o průměru 50 cm běžné konstrukce. Menší příkladací kulový integrátor se použije tehdy, když je možné měřit LED jednotlivě (pokud jejich uspořádání na plošném spoji toto umožní) a pokud je možno zanedbat ovlivnění přenosu tepla vedením z okolí LED do materiálu kulového integrátoru. Toto ovlivnění je výrazné u výkonných LED (určených zejména pro hlavní světelné funkce), kde dochází ke značnému vývinu tepla v době měření (po 30 minutách svícení). Materiál v okolí LED je rozežhátý na relativně vysokou teplotu (dle výkonu LED a konstrukce PCB) a v okamžiku mezi přiložením kulového integrátoru a uskutečněním měření dojde k výraznému ochlazení LED vlivem zmíněného nežádoucího odvodu tepla a měření ztrácí na objektivnosti (hodnoty světelného toku se mohou lišit až o desítky lumen právě kvůli rozdílným časům měření přiložením kulového integrátoru). Probíhající měření je zachyceno na obrázku v příloze č. 4 a).

Můžeme tedy konstatovat, že příkladací kulový integrátor lze použít k měření LED o nižších výkonech, kde dochází k menšímu vývinu tepla a následnému minimálnímu ovlivnění měření (samozřejmě je možné použít příkladací kouli pro měření výkonných LED, ale pouze pro měření za studena, tedy pouze pro měření pár okamžiků po rozsvícení) a pro výkonnější LED je třeba použít takový kulový integrátor, do kterého je možné vložit celé svítidlo (pro svítidla využívající LED světelné zdroje ve většině případů postačí kulový integrátor o průměru 50 cm). Výhoda většího kulového integrátoru spočívá v umístění světelného zdroje či svítidla do jeho vnitřního prostoru, je tedy možné změřit PCB o libovolném výkonu (nedochází k odvodu tepla vlivem přiložení) a jakémkoliv rozmístění LED.

Pro měření v následující kapitole byla použita měřicí sestava: Spektrofotometr CAS 140CT (výrobce Instrument Systems), příkladací kulový integrátor ISP 75 mm (tentýž výrobce), zdroj Keithley 2600 series a vyhodnocovací program SpecWin Pro.

## 4.3 MĚŘENÍ POKLESU SVĚTELNÉHO TOKU LED S NARŮSTAJÍCÍ TEPLOTOU

Znáмым problémem LED je odvod tepla z oblasti P-N přechodu. Se zvyšující se teplotou P-N přechodu dochází ke snižování světelného toku a životnosti. [12]

Pro návrh světlometu je nezbytná znalost teplotních poměrů světelného zdroje. Jelikož je možné stanovit napájecí proud LED dle požadovaného světelného toku, je logické,

že se se změnami napájecího proudu bude měnit velikost i průběh poklesu světelného toku s narůstající teplotou přechodu P-N. Toto je důvodem, proč je nutné provádět tato měření.

Zaznamenávanou veličinou je v tomto případě osvětlenost  $E$  ( $lx$ ). Bylo by možné měřit přímo pokles světelného toku, ale to je vzhledem k požadavkům měření velice komplikované. Hlavním požadavkem je zachování teplotních poměrů ve světlometu, je tedy nutné měřit světelný výstup (osvětlenost či svítivost) z kompletního světlometu. Existují světlomety různých tvarů a velikostí, proto by jejich umístění do kulového integrátoru bylo poněkud komplikované. Čidlo luxmetru je umístěné v takové vzdálenosti, aby byla dodržena následující podmínka bodového zdroje.

*„Bodový zdroj znamená, že zdroj má zanedbatelné rozměry  $a$  vzhledem ke vzdálenosti bodu  $r$ , ke kterému se provádí kontrolní měření. Tato podmínka se vyjádří poměrem těchto rozměrů  $\frac{r}{a} > a$ , v praxi je tento poměr požadován větší než 5, aby byl světelný zdroj chápán jako bodový“.* [12]

Ze získané osvětlenosti je následně zjištěn její procentní úbytek neboli koeficient poklesu světelného toku způsobený nárůstem teploty, jímž je možno určit teplotně (časově) závislý úbytek světelného toku. Zaznamenávání hodnot bylo provedeno stanovenými intervaly v době svícení 5 s až 30 min.

Pro měření poklesu světelného toku (viz následující kapitola) byl použit Spektrofotometr CAS 140CT s čidlem luxmetru EOP-146, stavitelná optická lavice a vyhodnocovací program SpecWin Pro. Pro odečtení teploty v okolí čipu bylo použito multimetru FLUKE 179 s termočlánekem typu K. Danou měřicí sestavu je možno vidět na obrázcích v příloze č. 4 b) a 4 c).

#### 4.4 MĚŘENÍ LED BĚHEM JEJICH NÁBĚHU, BINOVÁNÍ

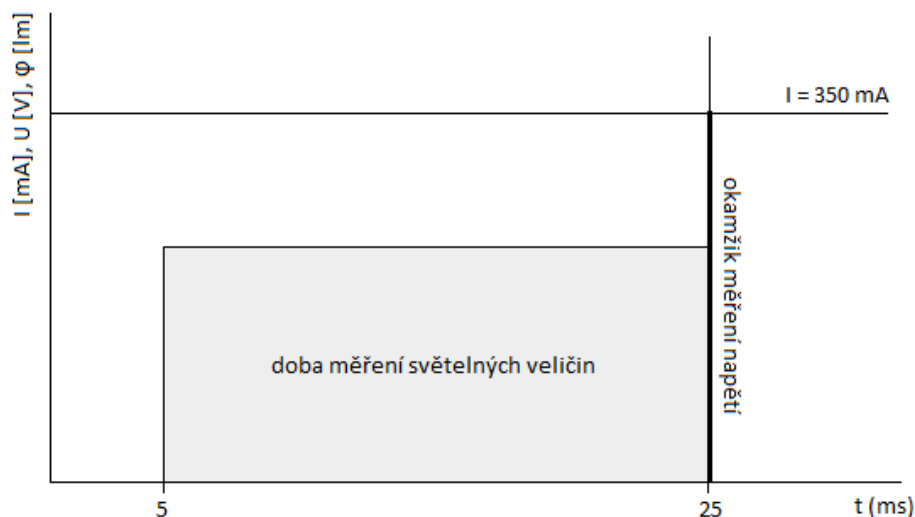
Během produkce jsou LED, vzhledem k technologické náročnosti výroby, vyráběny v různých barvách vyzařovaného světla, o různých světelných tocích a propustných napětích. LED jsou výrobcem změřeny a tříděny dle uvedených parametrů do tříd (oblastí) neboli binů. Tento proces se nazývá binování. Takže jednotlivé biny mohou obsahovat LED, které vyzařují světlo v barevných rozmezích udaných trichromatickými souřadnicemi  $x$ ,  $y$ , v rozmezích hodnot světelného toku a také propustného napětí. [13]

Doba, při které se během výroby LED provádí jejich měření, se pohybuje kolem 20 ms (stanovuje si ji sám výrobce).

Barevné rozmezí je určeno oblastmi v kolorimetrickém trojúhelníku, které jsou popsány trichromatickými souřadnicemi  $x$ ,  $y$ . Rozmezí světelného toku a propustného napětí jsou určena stanovenými mezemi. [14] (Názorná ukázka viz praktický experiment.)

Vzhledem k velice krátké době měření stanovené výrobcem je obtížné dodržet stejné podmínky měření. Pro provedení tohoto měření je nutné synchronizovat napájecí zdroj LED a spektrofotometr.

Pro měření (viz následující kapitola) bylo použito sestavy: Spektrofotometr CAS 140CT, zdroj konstantního proudu Keithley 2600 series, kulový integrátor ISP500 a vyhodnocovací program SpecWinPro. Sled měření je vyznačen na *Obr. 4.4.1*.



*Obr. 4.4.1: Sled měření LED po startu*

Z grafu výše tedy vyplývá, že měření probíhá při stanoveném proudu 350 mA (pro typ LED, který byl použit v praktickém experimentu). Po 5 ms svícení LED započne měření fotometrických veličin, které trvá 20 ms (tuto dobu udává zvolený integrační čas), po této době proběhne odečtení napětí.

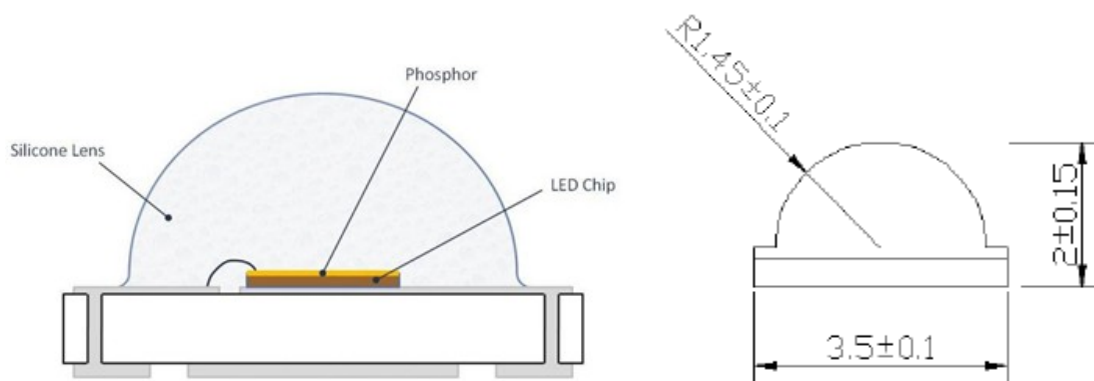
Ze získaných veličin při tomto měření jsme schopni ověřit správnost zatřídění dané LED do binů. To je hlavním důvodem, proč je měření realizováno.

## 4.5 MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI KOLORIMETRICKÝCH VELIČIN NA VYZAŘOVACÍM ÚHLU

Bílé světlo vycházející z LED pochází z diody emitující modré světlo, které prochází přes vrstvu žlutého a popřípadě červeného luminoforu. Podíl světla, které je transformováno, závisí na tloušťce vrstvy luminoforu, kterou paprsek prochází, což souvisí s vyzařovacím úhlem paprsku světla. Barva vyzařovaného světelného paprsku, který prochází luminoforovou vrstvou kolmo, má charakter namodralé bílé barvy. Zatímco se zvětšujícím se úhlem vyzařování se barva mění ke žluté barvě. [15]

Na následujícím obrázku můžeme vidět řez LED, který zachycuje nanesení luminoforové vrstvy na LED čip. Z toho je patrné, že světelný paprsek procházející kolmo skrze

tuto vrstvu ji protíná v nejkratší vzdálenosti. S rostoucím úhlem vyzařovaného paprsku narůstá protínaná vzdálenost luminoforovou vrstvou. Stejnou konstrukci má i LED použitá pro následující měření (viz *Obr. 4.5.1* vpravo).



*Obr. 4.5.1: Řez LED (vlevo) [X], řez SEUOL SSC - Z5 (vpravo) [XIV]*

Provedením měření závislosti trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$  na vyzařovacím úhlu jsme schopni ověřit přesnost (homogenitu) nanesení luminoforové vrstvy při výrobním procesu.

V praktickém experimentu (viz další kapitola) bylo použito sestavy jako v kapitole 4.3. Natáčení PCB bylo realizováno pomocí natáčecího mechanismu, viz obrázek v příloze č. 4 c). Nezbytné umístění LED do optické osy bylo provedeno zaměřením bodovým laserem, umístěným v ose s čidlem luxmetru.

## 4.6 MĚŘENÍ JASOVÝM ANALYZÁTOREM

Popis funkce a rozsahu využití jasového analyzátoru je nad rámec této práce, proto zde bude popsáno pouze jeho konkrétní využití, a to vyhodnocení homogenity jasu a homogenity barvy svítících ploch.

Využití jasového analyzátoru v automobilové technice může být dvojitý, buď vyhodnocování fotografie osvětlené plochy, nebo fotografie svítících ploch. V LED laboratoři je využíváno pouze druhé metody, a to k vyhodnocování homogenity jasu a barvy světla zejména světlovodných optických součástí užívaných pro denní svícení nebo poziciční či zadní svítidly. Cílem tohoto měření je zejména posouzení vizuálního charakteru, neboť jedním z hlavních požadavků zákazníka je vzhled (v tomto případě homogenita svítících ploch). Vyhodnocovány mohou být také velikosti svítících ploch.

Pro tento účel (viz praktický experiment v další kapitole) bude využíván jasový analyzátor LMK 5 color, vybavený třemi základními filtry X, Y, Z. [16]

## 5 VYHODNOCENÍ CHOVÁNÍ LED Z REALIZOVANÝCH MĚŘENÍ

Tato kapitola bude navazovat na teoretické rozborů jednotlivých měření provedených v kapitole předchozí. Bude vyhodnoceno celkem 5 praktických měření provedených v LED laboratoři ve firmě HELLA AUTOTECHNIK s.r.o. Cílem vyhodnocování jednotlivých měření je nahlédnutí do problematiky vývoje LED světlometů.

Pro vyhodnocení chování LED, tedy měření charakteristik, byla použita LED s označením SSC - Z5 series (výrobce SEOUL SEMICONDUCTOR). Tento světelný zdroj je používán pro denní svítidlo v automobilu XY a byl použit pro všechna následující měření vyjma měření jasovým analyzátořem.

### 5.1 KATALOGOVÉ ÚDAJE LED - SEOUL SSC - Z5

V tabulce níže se nacházejí základní údaje o zmiňované LED z příslušného katalogu. Výrobce udává podmínky měření těchto veličin jsou: proud 350 mA, teplota okolí 25 °C, relativní vlhkost 30 %. Dále výrobce uvádí tolerance měření, které jsou: světelný tok  $\pm 7\%$ , teplota chromatičnosti  $\pm 5\%$ , propustné napětí  $\pm 0,06$  V.

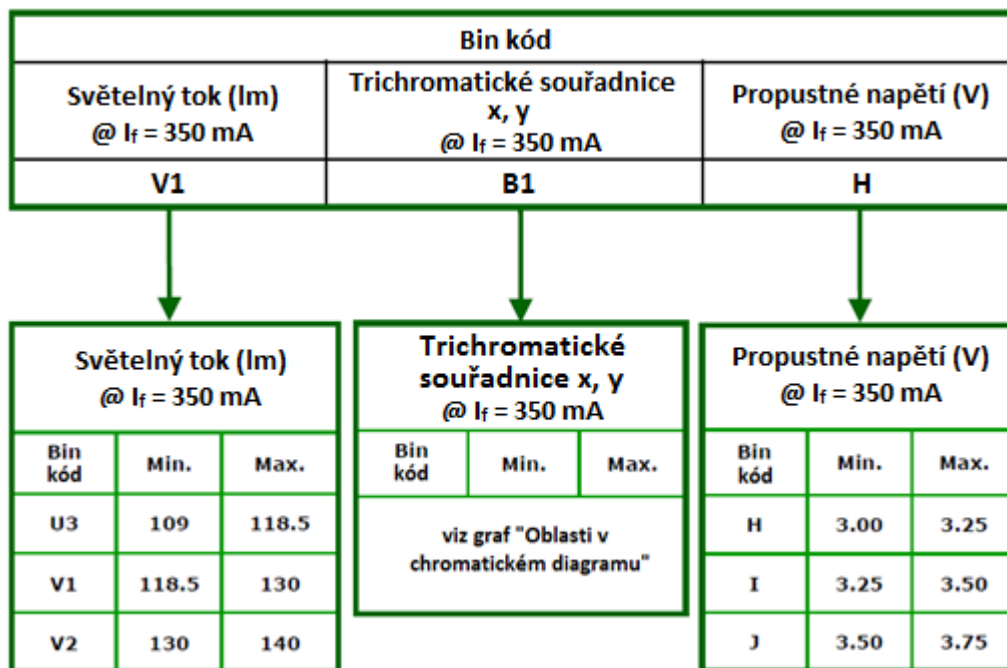
(Ta = 25 °C, RH30%)

Parametr	Symbol	Hodnota			Jednotka
		Min	Typ	Max	
Světelný tok	$\Phi$	-	124	-	lm
	$\Phi (T_j = 100\text{ °C})$	-	110	-	
Teplota chromatičnosti	CCT	-	6000	-	K
Index podání barev	R <sub>a</sub>	-	70	-	-
Propustné napětí	U	-	3,3	-	V

Obr. 5.1.1: Základní katalogové údaje k SEOUL SSC - Z5 [XIV]

Pozn. výrobce:  $\Phi$  je celkový světelný tok změřený v kulovém integrátoru.

Výňatek z katalogového listu, na němž výrobce udává tzv. bin kód a jemu odpovídající hodnoty jednotlivých veličin (světelný tok, trichromatické souřadnice a propustné napětí) a na jehož základě lze určit parametry konkrétní LED, můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obr. 5.1.1: Bin kód z katalogového listu [XIV]

Ze schématu na Obr. 5.1.1 jsou patrné údaje o světelném toku, propustném napětí a v poli trichromatických souřadnic je uvedena poznámka (viz graf „Oblasti v chromatickém diagramu“), tento graf je součástí kapitoly 5.4.1.

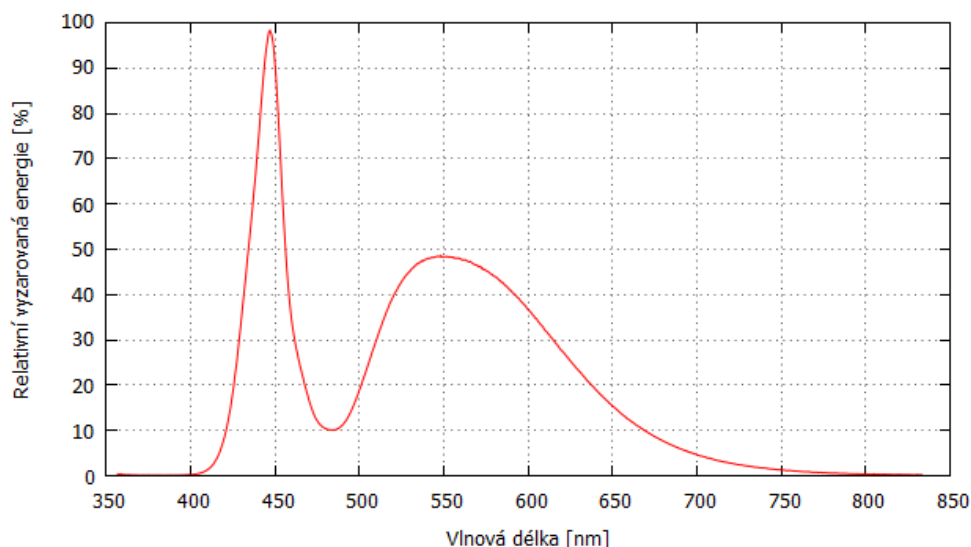
## 5.2 MĚŘENÍ KULOVÝM INTEGRÁTOREM PO TEPLOTNÍM USTÁLENÍ

Cílem následujícího měření bylo ověření předpokládaných parametrů zmíněné LED.

Během měření byla zaznamenána spektrální charakteristika LED, hodnoty světelného toku, teploty chromatičnosti, barvy, sytosti barvy, dominantní a centrální vlnové délky.

Měření bylo prováděno po teplotním ustálení LED (cca po 30 minutách svícení) za teploty okolí 25 °C a napájecím proudem 350 mA. Bylo použito měřicí sestavy zmíněné v kapitole 4.2.

### Spektrální charakteristika



Obr. 5.2.1: Naměřená spektrální charakteristika LED - SEUOL SSC - Z5

### Další výsledky

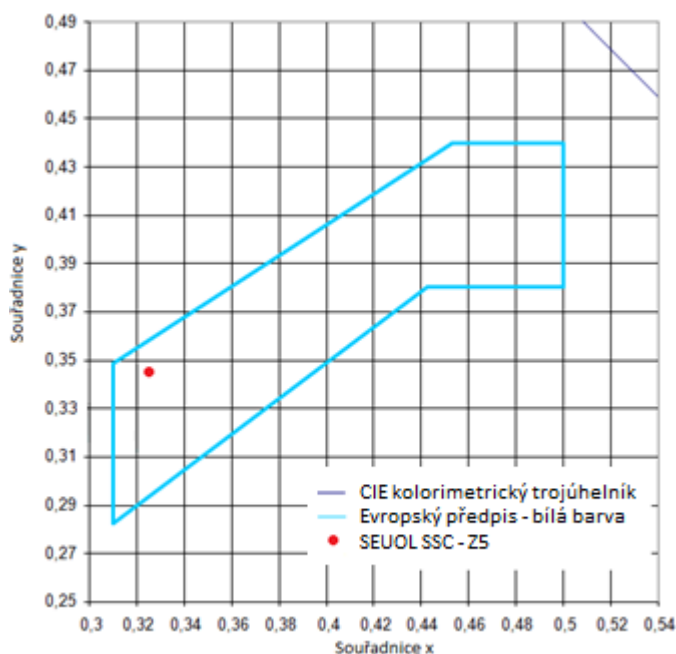
V následující tabulce jsou uvedeny změřené veličiny.

Tab. 5.2.1: Naměřené hodnoty kulovým integrátorem po teplotním ustálení

Název veličiny	Značka	Hodnota
Světelný tok	$\Phi$	111,73 lm
Teplota chromatičnosti	$T_c$	5782 K
Trichromatická souřadnice x	x	0,3259
Trichromatická souřadnice y	y	0,3461
Poloha maxima vlnové délky	-	455,29 nm
Centrální vlnová délka	$\lambda_p$	547,67 nm
Dominantní vlnová délka	$\lambda$	517,07 nm
Sytost	-	0,027
Index barevného podání	$R_a$	76,08

Pro lepší představu byly hodnoty trichromatických souřadnic zakresleny do předpisem definované oblasti v kolorimetrickém trojúhelníku, viz následující obrázek. Dle tohoto vyhodnocení lze považovat změřenou barvu za barvu splňující požadavky příslušného předpisu.





Obr. 5.2.2: Oblast bílé barvy (ECE) s naměřenými trichromatickými souřadnicemi

### Zhodnocení

Můžeme si všimnout naměřené hodnoty světelného toku (111,7 lm) po teplotním ustálení ve srovnání s tabulkou katalogových hodnot (viz Obr. 5.1.1), kde je uvedena hodnota světelného toku při teplotě P-N přechodu 100 °C rovna 110 lm. Z toho je možné usuzovat, že byly dodrženy stejné podmínky měření u výrobce a u výše uvedeného měření. Dalším ověřením byla posouzena naměřená barva světla jako barva splňující evropský předpis (tento údaj výrobce neuvádí, uváděn je pouze údaj z měření po 25 ms svícení, ověření barvy světla za těchto podmínek bude předmětem kapitoly 5.4).

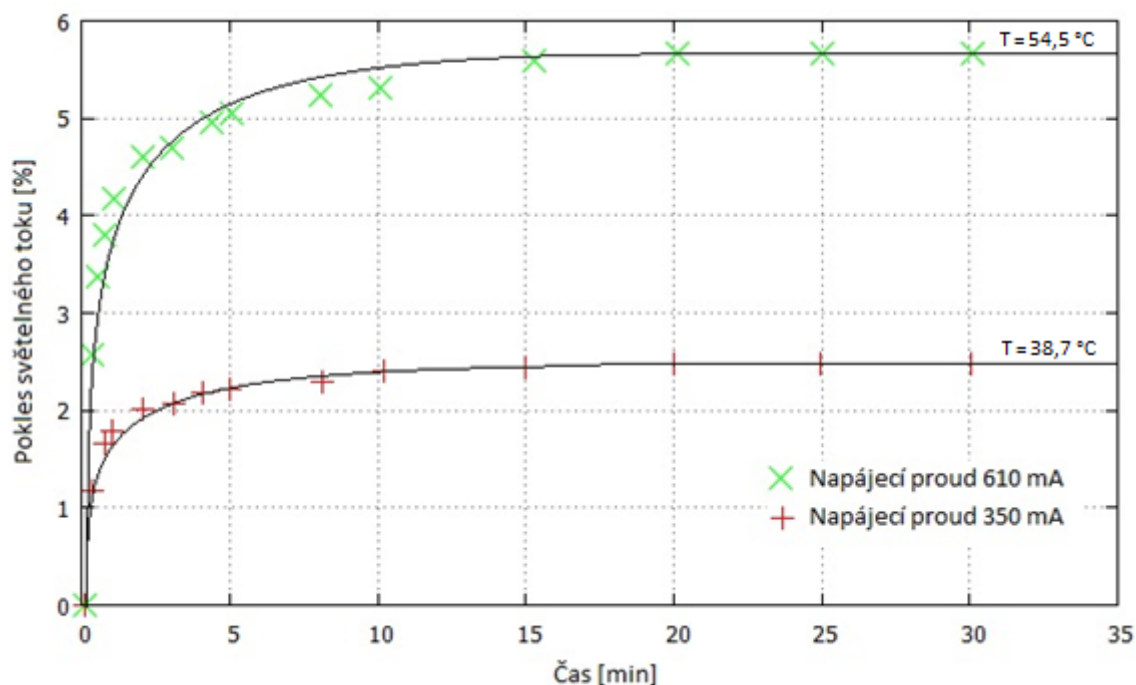
## 5.3 MĚŘENÍ POKLESU SVĚTELNÉHO TOKU LED S ROSTOUCÍM ČASEM SVÍCENÍ

Cílem tohoto měření bylo obeznámení se s chováním LED po zvýšení napájecího proudu z hlediska úbytku světelného toku s dobou svícení (rostoucí teplotou). Maximální dovolený napájecí proud dle výrobce je 700 mA, pro tento experiment byl zvolen proud 610 mA.

Při tomto měření byly postupně odečítány hodnoty osvětlenosti ( $lx$ ) LED umístěné kolmo k čidlu luxmetru a na konci tohoto měření byl odečten světelný tok kulovým integrátorem.

Měření bylo prováděno v časovém intervalu 5 s až 30 min svícení, za teploty okolí 25 °C, napájecím proudem 350 mA a 610 mA. Bylo použito měřicí sestavy zmíněné v kapitole 4.3.

Následující graf na Obr. 5.3.1 zachycuje průběhy procentního úbytku světelného toku při rostoucím čase (teplotě) při obou napájecích proudech.



Obr. 5.3.1: Průběhy procentních poklesů světelných toků s délkou svícení

Hodnoty světelného toku naměřeného po teplotním ustálení byly 163 lm (610 mA) a 112 lm (350 mA). Nárůst užitého světelného toku byl u zvýšeného proudu o více než 30 % hodnoty světelného toku při napájecím proudu 350 mA, přičemž nárůst příkonu LED byl 81 % (1,07 W při proudu 350 mA a 1,94 W při zvýšeném proudu).

### Zhodnocení

K ustálení světelného toku došlo v obou případech po necelých 20 minutách svícení.

Při napájecím proudu 350 mA však došlo k nárůstu teploty okolí čipu na 38,7 °C, v druhém případě na 54,5 °C. Procentní rozdíl úbytku světelného toku způsobeného vlivem zvyšující se teploty je 2,5 % pro napájecí proud 350 mA a 5,7 % pro zvýšený napájecí proud 610 mA. Závěrem lze tedy říci, že při návrhu světloometu a zvyšování napájecího proudu LED za účelem zvýšení světelného toku je třeba počítat s rostoucím procentním úbytkem světelného toku. V tomto případě rozdíl poklesů světelného toku mezi dvěma napájecími proudy činil 3,2 %. Patrný je také rozdíl v teplotách okolí čipu po teplotním ustálení, který činil bezmála 15,8 °C, což může také výrazně ovlivnit řadu činitelů při návrhu světloometu.

## 5.4 MĚŘENÍ LED BĚHEM JEJICH NÁBĚHU, ZAŘAZENÍ DO BINU DLE VÝROBCE

Vzhledem ke komplikovanosti výroby LED a jejich následnému třídění je důležité mít možnost kontroly dodávky LED od výrobců. V následujícím experimentu bude změřena LED (opět typ SSC – Z5) a bude demonstrováno ověření jednotlivých parametrů.

Postup měření byl již zmíněn v kapitole 4.4. Měření bude prováděno při napájecím proudu 350 mA a hodnota světelného toku, trichromatických souřadnic a napětí bude odečtena v době 25 ms po přivedení napětí k LED.

Změřením byly získány následující výsledky:

Tab. 5.3.1: Naměřené hodnoty potřebné pro zařazení LED do binu

Hodnota světelného toku	Trichromatické souřadnice	Propustné napětí
122,5 lm	x = 0,33062, y = 0,35047	3,200 V

### 5.4.1 Srovnání naměřených hodnot s hodnotami udávanými výrobcem

Změřené hodnoty byly srovnány s výrobcem udávanými hodnotami následujícím postupem (1-3):

- 1) Dle bin kódu na Obr. 5.1.1 byla získána výrobcem definovaná rozmezí hodnot následujících veličin pro konkrétní LED:
  - **V1** (rozmezí hodnot světelného toku při napájecím proudu 350 mA): 118,5 – 130 lm
  - **B1** (pole v kolorimetrickém trojúhelníku definované souřadnicemi x, y, při napájecím proudu 350 mA):

B1	
CIE x	CIE y
0.3292	0.3539
0.3293	0.3461
0.3373	0.3534
0.3376	0.3616

Obr. 5.4.1.1: Definice binu B1 trichromatických souřadnic

Pro zřetelnost byl tento bin společně s ostatními zakreslen do grafu na Obr. 5.4.1.2.

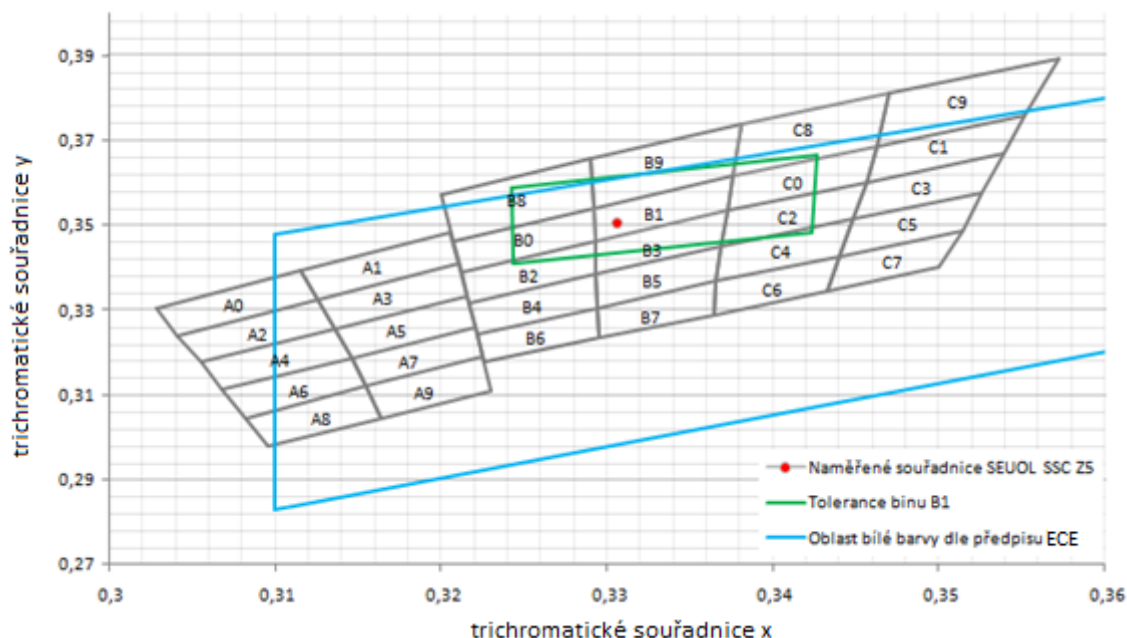
- **H** (rozmezí hodnot propustného napětí při napájecím proudu 350 mA): 3 – 3,25 V

2) Ověření měřením, získání potřebných hodnot.

- Hodnota světelného toku: 122,5 lm
- Trichromatické souřadnice:  $x = 0,33062$ ,  $y = 0,35047$
- Propustné napětí: 3,200 V

3) Porovnání výsledků měření s bodem 1)

- Hodnota skutečného světelného toku spadá do kategorie V1, jak uvádí výrobce.
- Z pohledu barvy světla můžeme konstatovat, že změřené trichromatické souřadnice přesně odpovídají katalogem uváděnému binu B1. Grafické zobrazení a zařazení se nachází na Obr. 5.4.1.2.
- Změřené propustné napětí odpovídá rozmezí udávanému výrobcem.



Obr. 5.4.1.2 Zařazení změřených trichromatických souřadnic do binu

### Zhodnocení

Měřením byly ověřeny výrobcem udávané parametry světelného toku, trichromatických souřadnic a propustného napětí. Dle vyhovujících výsledků všech veličin byla LED posouzena jako správně zařazena. V žádném ze tří uvedených případů nebylo nutné počítat s tolerancemi naměřených hodnot udávaných výrobcem. Tímto úspěšným zařazením LED se také potvrdila přesnost měřicích přístrojů a správnost zvolené metodiky, což je velké pozitivum vzhledem k nově zavedenému postupu měření v LED laboratoři.

## 5.5 ZÁVISLOST KOLORIMETRICKÝCH VELIČIN NA HORIZONTÁLNÍM ÚHLU

Cílem tohoto měření je poukázat na negativum bílých LED, a to výraznou změnu trichromatických souřadnic a teploty chromatičnosti s vyzařovacím úhlem. Zdůvodnění tohoto jevu se nachází v kapitole 4.5.

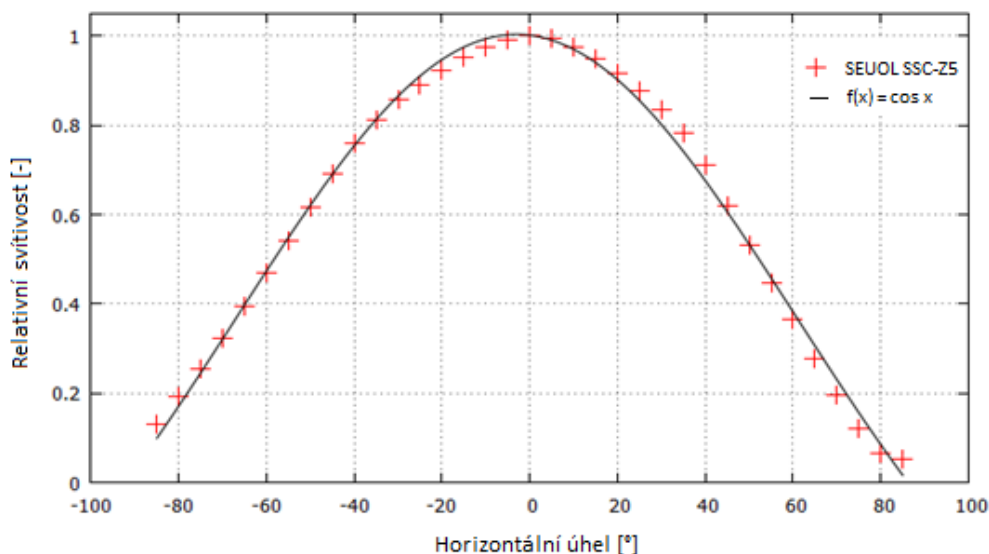
Pro měření bylo opět použito sestavy: čidlo luxmetru EOP 146, spektrofotometr CAS 140CT, zdroj konstantního proudu Keithley 2600 series, vyhodnocovacího programu SpecWin Pro a natáčecího mechanismu Thorlabs (viz obrázek v příloze č. 4 c).

Podmínky měření: okolní teplota 25 °C, napájecí proud 350 mA a zvolený interval otáčení 5°.

### 5.5.1 Ověření vyzařovací charakteristiky

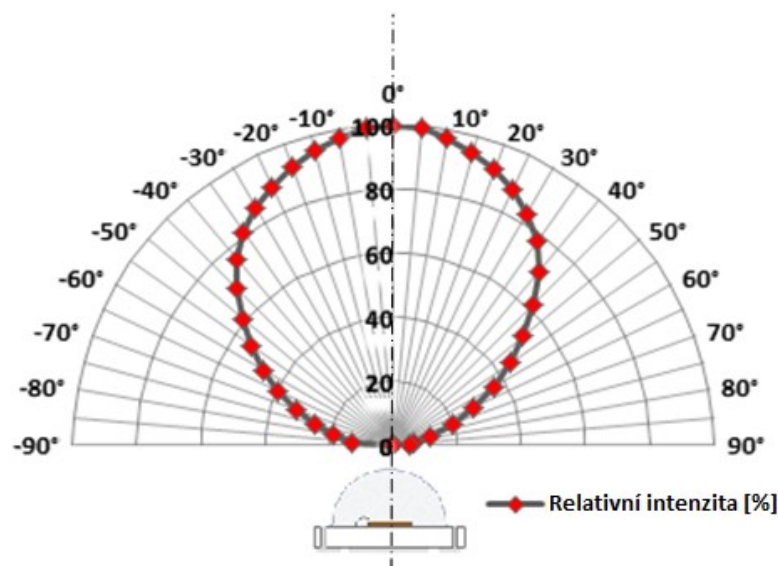
Prvním krokem k provedení měření závislosti trichromatických souřadnic a teploty chromatičnosti na vyzařovacím úhlu je ověření předpokladu, že se měřená LED chová jako tzv. kosinový zářič, tzn., že jeho vyzařovací charakteristika bude opisovat křivku se závislostí na kosinu úhlu vycházejícího paprsku. Tento předpoklad je založen na skutečnosti, že se jedná o rotačně symetrický zdroj (viz Obr. 4.5.1 vpravo). Ověření bylo provedeno pouze pro horizontální rovinu, a to kvůli omezení natáčecím zařízením, které neumožňuje pohyb po vertikální rovině. Výsledkem měření jsou dvě grafická zpracování naměřených hodnot na Obr. 5.5.1 a Obr. 5.5.2.

Následující charakteristika umožňuje odečít procentní hodnoty relativní intenzity svítivosti v daném horizontálním úhlu od 0° až do 85° v záporných i kladných hodnotách úhlů. Změřené svítivosti označené body v grafu jsou srovnány s funkcí kosinus.



Obr. 5.5.1: Vyzařovací charakteristika v kartézských souřadnicích

Pro přehlednost byly naměřené hodnoty zaznamenány také do grafu v polárních souřadnicích, viz následující obrázek.

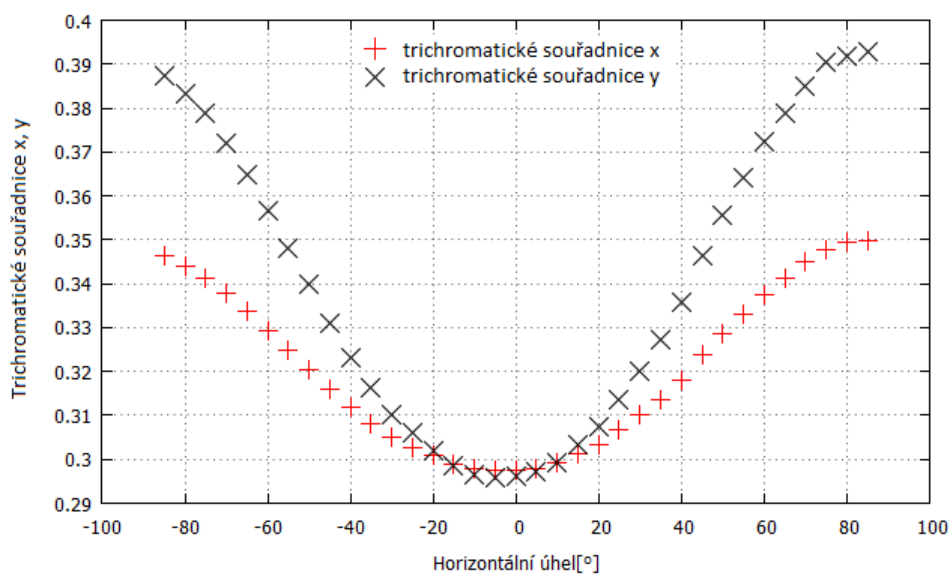


*Obr. 5.5.2: Vyzařovací charakteristika v polární soustavě souřadnic*

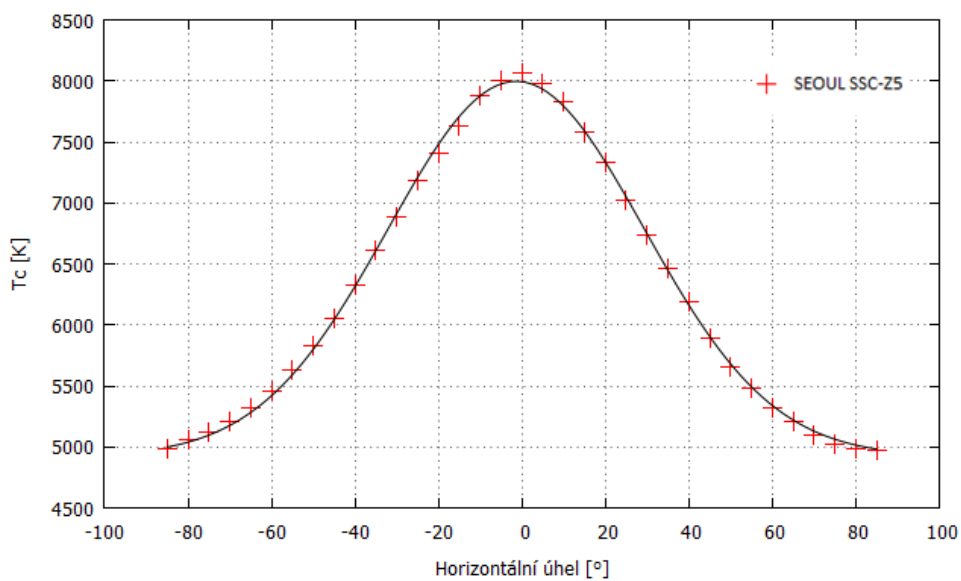
### 5.5.2 Závislost trichromatických souřadnic $x$ , $y$ na horizontálním úhlu

Naměřené trichromatické souřadnice byly zaznamenány do následujícího grafu (*Obr. 5.5.2.1*), dále byla vynesena také závislost teploty chromatičnosti na témže úhlu.

Z následující charakteristiky lze posoudit homogenitu nanesené luminoforové vrstvy. Nepatrná odchylka nastává pouze v úhlech  $70 - 85^\circ$ . V této oblasti dochází k určité nesymetrii souřadnic v kladných úhlech vůči záporným úhlům. Tuto odchylku může, dle mého názoru, vysvětlovat nejistota měření způsobená špatnou kvalitou vyhodnocovaného signálu, popřípadě technologie výroby.

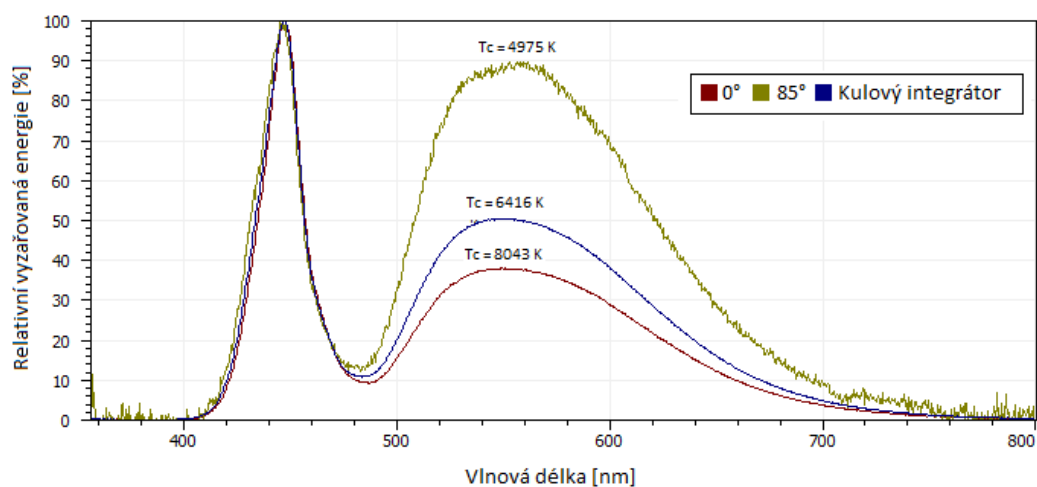


Obr. 5.5.2.1: Závislost trichromatických souřadnic na horizontálním úhlu



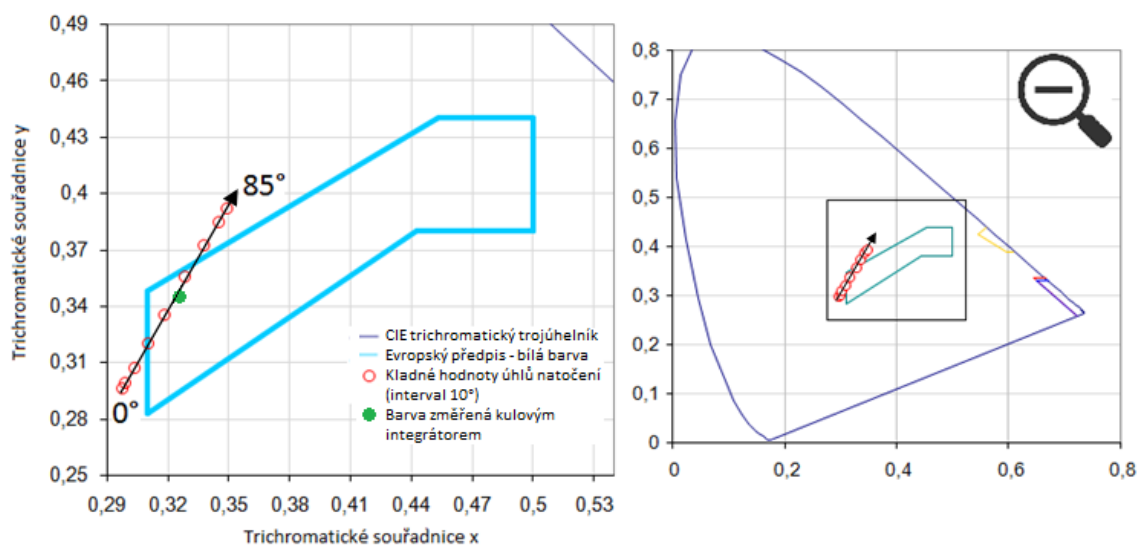
Obr. 5.5.2.2: Průběh změny náhradní teploty chromatičnosti se změnou horizontálního úhlu

Předchozí grafická vyobrazení jsou dále doplněna o srovnání spektrálních charakteristik při úhlech: 0°, 85° a charakteristikou získanou měřením v kulovém integrátoru.



Obr. 5.5.2.3: Spektrální charakteristiky při vybraných úhlech natočení LED a charakteristika z kulového integrátoru

V dalším grafu (viz Obr. 5.5.2.4) jsou naměřené hodnoty trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$  vyneseny do CIE kolorimetrického trojúhelníku. Pro lepší přehlednost byly vybrány pouze hodnoty při horizontálních úhlech  $0^\circ$  až  $80^\circ$  v intervalu  $10^\circ$  a úhlu  $85^\circ$ . Z tohoto zobrazení je patrný posun barvy s narůstajícím úhlem od namodralé bílé k nažloutlé bílé barvě. To samé platí i pro záporné hodnoty úhlů.



Obr. 5.5.2.4: Posun barvy vyzařovaného světla se změnou horizontálního úhlu v kolorimetrickém trojúhelníku

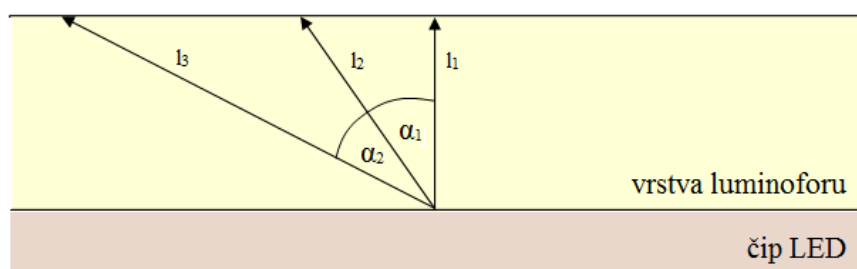


### 5.5.3 Závislost trichromatických souřadnic a teploty chromatičnosti na délce prostupu paprsku luminoforem

Pro výpočet délek prostupu světelného paprsku luminoforem bylo použito vztahu odvozeného ze schématu na Obr. 5.5.3.1. Jeho tvar je následovný:

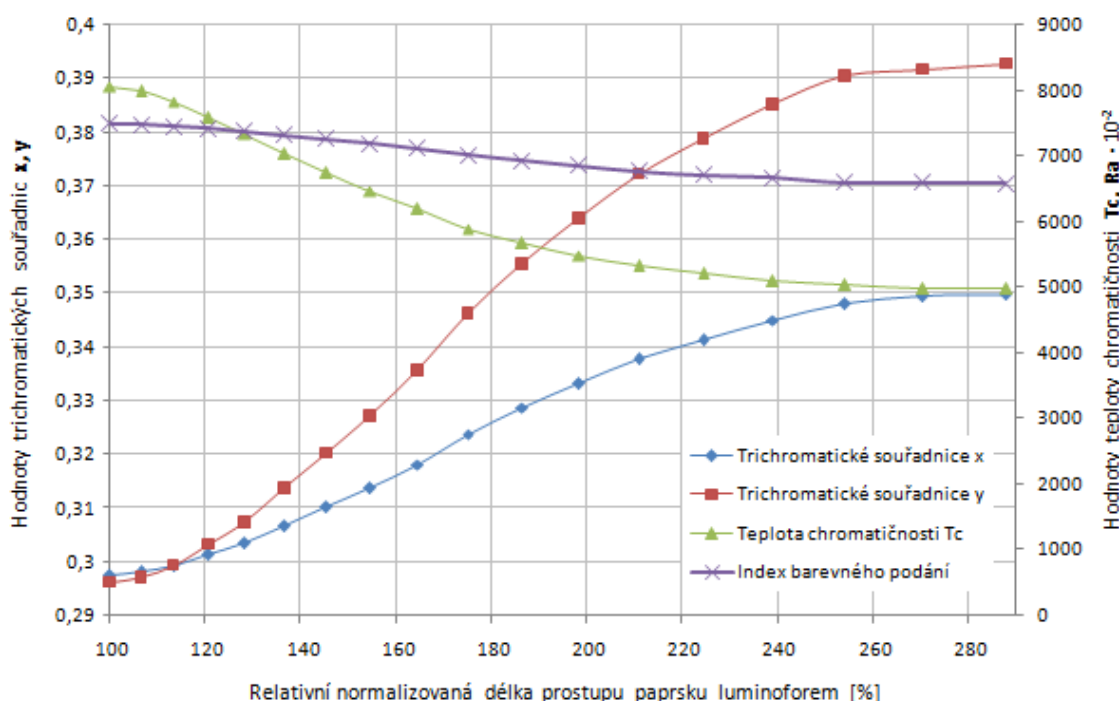
$$l_n = \frac{l_1}{\cos \alpha_n} [\%], \quad (3)$$

kde vzdálenost  $l_1$  je rovna tloušťce vrstvy luminoforu v kolmém řezu, vzhledem k tomu, že neznáme její přesnou hodnotu, vyjádříme její velikost jako procento tloušťky dané vrstvy, tedy 100 %. Úhel  $\alpha_n$  odpovídá úhlům natočení LED na otočném zařízení.



Obr. 5.5.3.1: Schéma prostupu světelného paprsku vrstvou luminoforu

Na následujícím grafu je horizontální osa označena jako relativní normalizovaná délka prostupu luminoforem. Normalizovanou délkou se myslí délka v kolmém řezu vrstvou luminoforu, je tedy rovna 100 % (na Obr. 5.5.3.1 označena jako  $l_1$ ). Příslušné hodnoty změřených veličin (trichromatické souřadnice  $x$ ,  $y$ , teplota chromatičnosti  $T_c$  a index podání barev  $R_a$ ) jsou vyneseny do následujícího grafu v závislosti na zmíněné normalizované délce prostupu.



Obr. 5.5.3.1: Závislost změřených veličin na délce prostupu světelného paprsku lumínoforem

### Zhodnocení

Vyhodnocením naměřených dat byl zaznamenán posun trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$  v závislosti na horizontálním úhlu a taktéž s tím související teploty chromatičnosti. Tento posun se jeví jako velmi významný, neboť v případě změny bílé barvy světla (viz Obr. 5.5.2.4) se výsledná barva světla nachází mimo předpisem definovanou oblast. S tímto jevem je tedy nutné počítat při návrhu světlometu.

Další částí vyhodnocení je vztah mezi délkou prostupu paprsku a změřených veličin. Ideálním případem by byly vodorovné lineární průběhy jednotlivých veličin. Teoreticky by tohoto stavu šlo dosáhnout, kdyby byla zajištěna proměnná tloušťka lumínoforové vrstvy ve tvaru paraboly. Nebo přípravkem či zařízením, které by vycházející světelný svazek požadovaně transformovalo, což však neřeší problém vyzařování samotné světelné diody, a jistě by toto řešení několikanásobně zdražilo daný celek. Simulace a návrh zmíněných úprav jsou předmětem návrhu dalšího postupu.

## 5.6 MĚŘENÍ JASOVÝM ANALYZÁTOREM

Následující vyhodnocení jasovým analyzátozem v praxi slouží jako přesné vyhodnocení homogenity jasu a barvy místo subjektivního vyhodnocení zrakem. U této problematiky nejsou žádná kritéria udaná předpisem (vyhovuje-li daná funkce světlometu předepsaným svítivostem, může již být uvedena do výroby, nemusí však vyhovovat vizuální požadavkům

zákazníka). Jasovým analyzátozem je také možné relativně přesně vyhodnotit případná zlepšení z pohledu homogenity jasu a barvy dosažených úpravami na světlometu.

Pro tento účel byl použit jasový analyzátor LMK 5 color v kombinaci s vyhodnocovacím programem LMK LabSoft. Vzdálenost od svítící plochy, do které byl jasový analyzátor umístěn, byla zvolena dle ohniskové vzdálenosti objektivu (cca 3 m). Poloha světlometu byla kolmo k jasovému analyzátoru, v takové pozici, v jaké se světlomet nachází namontovaný v automobilu.

### **5.6.1 Vyhodnocení homogenity jasu tlustostěnné optické plochy**

Pro tento praktický experiment bylo použito části světlometu z tlustostěnné optiky sloužícího jako denní svítidla. Za tlustostěnnou optikou se nacházejí jednotlivé LED v určitém rozestupu a počtu. Cílem tohoto vyhodnocení bude posoudit homogenitu jasu této svítící plochy a popsat zvolenou metodiku.

K pořízení fotografie na *Obr. 5.6.1.2* jasovým analyzátozem byl použit  $V(\lambda)$  filtr. Tato fotografie slouží pro vizuální posouzení jasové homogenity.

Pro lepší představu o účelu a umístění vyhodnocované svítící plochy byla přidána fotografie světlometu na *Obr. 5.6.1.1*, na které se nenachází přímo vyhodnocovaný světlomet, a to z důvodu utajení. Na této fotografii se nachází analogicky využitá část světlometu dále vyhodnocované.

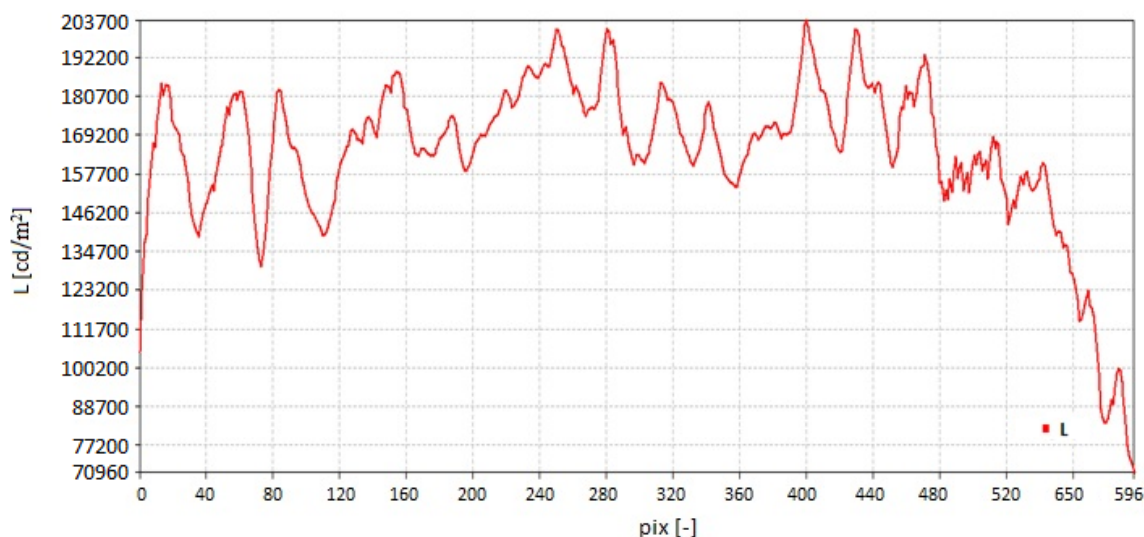


*Obr. 5.6.1.1: Fiktivní světlomet s využitím světlovodné optiky s obdobným využitím [XV]*



Obr. 5.6.1.2: Snímek svítící plochy pořízený jasovým analyzátozem

Přesnější vyhodnocení v řezu svítící plochou (přerušovaná čára vedoucí středem svítící plochy celou její délkou, viz fotografie) bylo učiněno programem LMK LabSoft. Program nevyhodnocuje pouze pixely ležící pod přerušovanou čarou (řezem), ale stanovené okolí kolem ní. To se stanovuje tak, aby do vyhodnocované plochy nezasahovaly neaktivní části svítící plochy neboli plochy o zanedbatelném jas. Výsledek vyhodnocení řezu můžeme vidět na následujícím grafu.



Obr. 5.6.1.3: Graf vyhodnocení řezu svítící plochy

Očividnou nelinearitu na tomto grafu způsobují rozestupy mezi jednotlivými LED. Díky tomuto zobrazení můžeme odečíst maximální a minimální hodnoty jasů a určit jejich pozici s určitou přesností v závislosti na rozlišení fotografie.

Z grafu odečteme maximální a minimální hodnoty jasů:  $L_{\max} = 203700 \text{ cd/m}^2$  a  $L_{\min} = 70960 \text{ cd/m}^2$  a uvedeme je do poměru  $u$ .

$$u = \frac{L_{\max}}{L_{\min}} = \frac{203700}{70960} = 2,87 \quad (4)$$

Poměrem těchto dvou hodnot získáme tzv. index homogenity 2,87, dle kterého je možno posoudit kvalitu svítící plochy z pohledu jasové homogenity. Hella standardem je, že pokud je index homogenity roven číslu 5 a vyššímu, je homogenita posuzována jako nevyhovující. Vyhodnocovaná svítící plocha je tedy z pohledu jasové homogenity vyhovující.

### 5.6.2 Vyhodnocení homogenity barvy tlustostěnné optické plochy

Postup posuzování barevné homogenity je totožný s postupem v kapitole 2.6.1. Rozdíl je pouze v použití odlišných filtrů, v tomto případě tří filtrů dle souřadnic barevného prostoru X, Y a Z. Jejich pomocí získáme následující fotografii, která poslouží opět pouze k vizuálnímu posouzení.

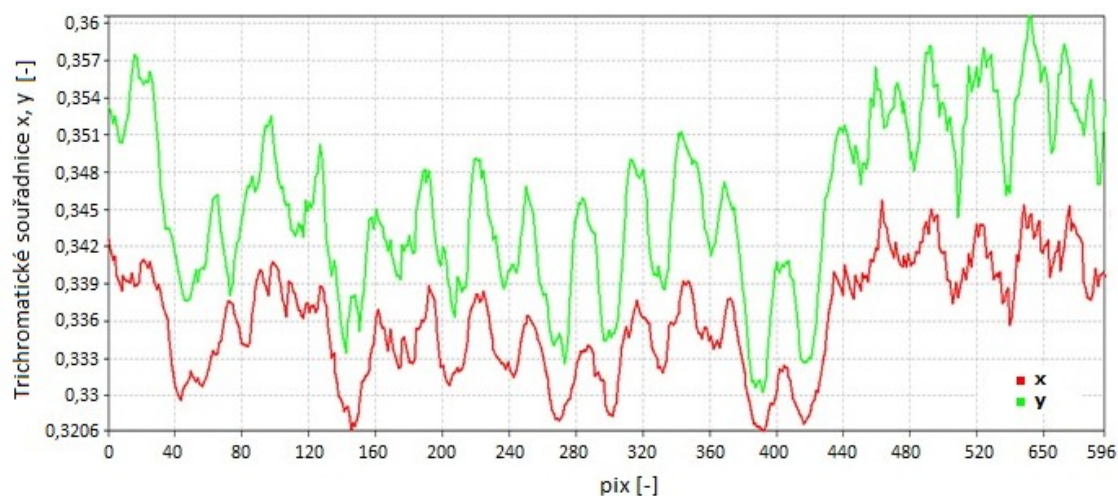


Obr. 5.6.2.1: Barevný snímek svítící plochy pořízený jasovým analyzátozem

Pro přesné vyhodnocení bylo opět použito řezu a zpracování v programu LMK LabSoft. Výsledkem jsou průběhy trichromatických souřadnic x, y v závislosti na počtu pixelů (poloze). Výsledky jsou zachyceny na Obr. 5.6.2.2. Z tohoto grafu byly opět odečteny extrémy jednotlivých průběhů, tedy maximální a minimální hodnoty jednotlivých trichromatických souřadnic, a určeny jejich maximální odchylky.

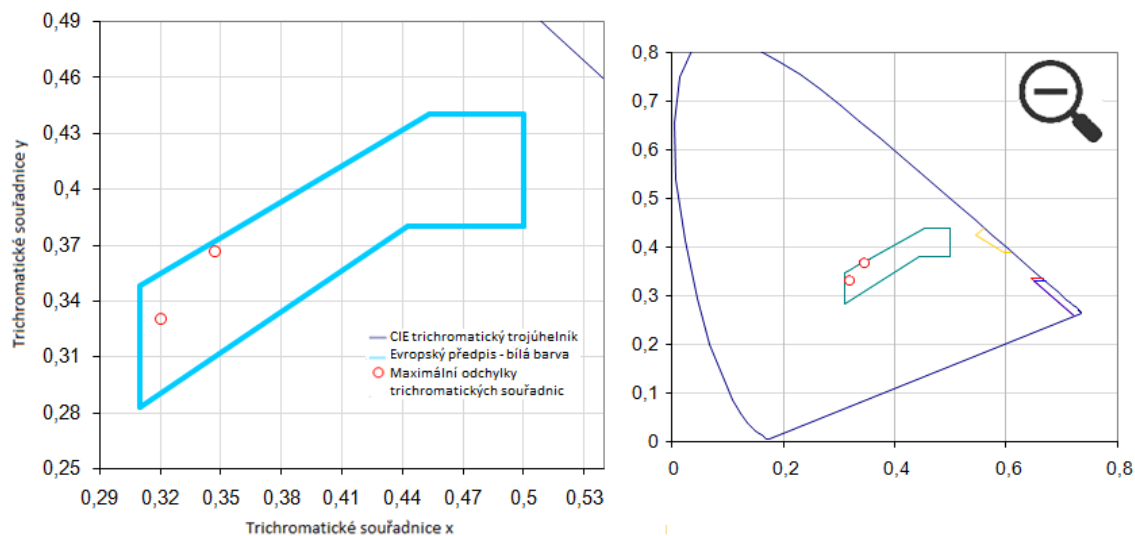
$$\Delta x = x_{\max} - x_{\min} = 0,3472 - 0,3206 = 0,0266 \quad (5)$$

$$\Delta y = y_{\max} - y_{\min} = 0,3665 - 0,3303 = 0,0362 \quad (6)$$



Obr. 5.6.2.2: Graf s hodnotami jednotlivých trichromatických souřadnic

Do kolorimetrického trojúhelníku byla zakreslena maxima a minima trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$  (vyznačené jako body na Obr. 5.6.2.3) pro představu v jakých rozmezích se výsledná barva světla pohybuje.



Obr. 5.6.2.3: Rozptyl bílé barvy v kolorimetrickém trojúhelníku

## ZÁVĚR

Teoretickou částí jsem se seznámil s problematikou měření světelně technických veličin požadovaných evropskými předpisy na automobilové svítlny, se světelnými zdroji užívanými v tomto průmyslovém odvětví a se zařízeními, které slouží k ověřování daných veličin. Cílem těchto kapitol bylo uvedení do kontextu a navázání na praktickou část, která se již zaměřovala na vyhodnocování LED světelných zdrojů užívaných zejména pro hlavní funkce světlometů.

V prvním praktickém experimentu jsem změřil LED v kulovém integrátoru, srovnal výsledky s katalogovým listem příslušné LED a získal potřebnou informaci o barvě světla po teplotním ustálení LED, která se v katalogu neuvádí. Ověřil jsem si hodnotu světelného toku, který se shodoval s uvedeným tokem v katalogu při teplotě P-N přechodu 100 °C. Dalším ověřovaným parametrem byla barva světla v teplotně ustáleném stavu LED. Zjistil jsem, že při napájecím proudu 350 mA barva odpovídá předpisu. Uvedl jsem také ostatní změřené parametry ( $T_c$ ,  $R_a$ , sytost, centrální a dominantní vlnovou délku). Tato metodika měření LED je vhodná pro získání parametrů, které bude tento světelný zdroj schopen trvale podávat.

Dalším měřením jsem zjistil pokles světelného toku s rostoucí teplotou P-N přechodu LED při různých napájecích proudech. Zvolil jsem katalogový proud 350 mA a zvýšený 610 mA. Hodnoty jsem odečítal v intervalu od 5 s do 30 minut svícení. Při napájení proudem 350 mA poklesl světelný tok o 2,5 % na hodnotu 112 lm a při zvýšeném proudu o 5,7 % na hodnotu 163 lm. Změřil jsem také teploty okolí LED čipu, které byly 38,7 °C (350 mA) a 54,5 °C (610 mA). Pro zjištění doby ustálení světelného toku jsem sestrojil graf s průběhy obou poklesů. Došel jsem k dobám 17,5 minuty (350 mA) a 19 minut (610 mA). Tento graf poslouží také pro potřeby odečtení procentního poklesu světelného toku v určitém čase.

Třetím praktickým experimentem bylo ověření výrobcem udávaného bin kódu příslušné LED. V prvním kroku jsem získal potřebný čas měření parametrů obsažených v bin kódu. Ten je 25 ms. V tomto čase jsem za pomoci synchronizované měřicí soustavy odečetl hodnoty světelného toku, trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$  a propustného napětí. Následně jsem naměřené hodnoty srovnal s mezemi hodnot v bin kódu a označil LED jako správně zařazenou, protože se všechny hodnoty pohybovaly v předepsaných mezích. Těmito pozitivními výsledky byla také ověřena správnost metodiky měření a přesnost synchronizované měřicí soustavy.

Ve čtvrtém měření jsem se zaměřil na negativní jev bílých LED, a to změnu spektrálních vlastností s vyzařovacím úhlem (-85° až 85° na horizontální ose) a na popsání příčiny tohoto jevu. V první části jsem si ověřil vyzařovací charakteristiku LED, změřil a vynesl do grafu změny trichromatických souřadnic  $x$ ,  $y$  a náhradní teploty chromatičnosti. Součástí bylo také srovnání spektrálních charakteristik v úhlech natočení 0°, 85° s charakteristikou získanou měřením v kulovém integrátoru. Při úhlu 85° dosahovala teplota chromatičnosti 4975 K, v úhlu 0° pak 8043 K, v kulovém integrátoru byla výsledná teplota chromatičnosti 6416 K. Rozdíl tedy činil až 3068 K a je způsoben dále popsanou příčinou.

Také změna barvy vyzařovaného světla byla významná, a to proto, že se vlivem tohoto jevu pohybovala i za hranicí předepsané barvy. Další částí byl výpočet relativní délky prostupu paprsku luminoforem při daných úhlech, který jsem následně vynesl do grafu se změřenými trichromatickými souřadnicemi, náhradní teplotou chromatičnosti a indexem podání barev. Z výpočtu vyplynulo, že mezi kolmým prostupem paprsku luminoforem a prostupem při největším úhlu je rozdíl délky prostupu trojnásobný. Výsledkem je, že tento rozdíl způsobil změnu teploty chromatičnosti o cca 3000 K, rozdíl indexu podání barev o více než 10 jednotek a výraznou změnu trichromatických souřadnic. Průběhy těchto změn s délkou prostupu paprsku luminoforem jsem také vynesl do grafu.

Posledním praktickým experimentem bylo vyhodnocení jasové a barevné homogenity denní svítilny. Za pomoci jasového analyzátoru jsem pořídil fotografii přes filtr s citlivostí  $V(\lambda)$  a barevnou fotografii přes barevné filtry X, Y, Z. Tyto fotografie mi posloužily pro následnou analýzu softwarem LMK Labsoft. V obou vyhodnoceních dopadla denní svítilna dle standardu Hella velmi obstojně.

Výše uvedená měření jsem zvolil s ohledem na současné požadavky firmy Hella Autotechnik. Vzhledem k široké škále měření, se kterými jsem se setkal, jsem získal povědomí o dané problematice. Ve zmíněné firmě jsem absolvoval „trainee program“, během kterého mi bylo umožněno také nahlédnutí do celého procesu výroby světlometů, setkal jsem se tedy s více obory a získal povědomí o jejich propojenosti a spolupráci. Má činnost ve zmíněné firmě v LED laboratoři se netýkala pouze provádění uvedených měření, ale bylo mi umožněno podílet se na celé realizaci laboratoře, její vybavování a školení odborníky z firem dodávajících měřicí zařízení, což mi přineslo cenné praktické zkušenosti v oboru. Zpracování diplomové práce, včetně působení ve zmíněné firmě, bylo pro mne velkým přínosem.

Návrhem dalšího postupu je navázání na měření změny spektrálních vlastností LED s úhlem vyzařování. V této písemné práci jsem uskutečnil měření na samotné, nezabudované LED. Pro její využití je ale nutné provést vyhodnocení tohoto ovlivnění LED zabudované ve světlometu, nejlépe provést simulaci, a následně vyhodnotit konečný světelný výstup. Závěrem navrženého postupu by mělo být srovnání vyhodnoceného světelného výstupu z LED samotné a zabudované.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. PŘEDPIS č. 48 *Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska montáže zařízení pro osvětlení a světelnou signalizaci*. E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.47/Rev.9. Březen 2014.
2. PŘEDPIS č. 112 *Jednotná ustanovení pro homologaci světlometů motorových vozidel, které vyzařují asymetrické potkávací světlo nebo dálkové světlo nebo obojí a které jsou vybaveny žárovkami a/nebo LED moduly*. E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.111/Rev.2. Listopad 2012.
3. PŘEDPIS č. 19 *Jednotná ustanovení pro schvalování předních mlhových světlometů motorových vozidel*. E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.18/Rev.7. Březen 2014.
4. PŘEDPIS č. 6 *Jednotná ustanovení pro schvalování směrových svítlen motorových vozidel a jejich přípojných vozidel*. E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.5/Rev.5. Březen 2014.
5. PŘEDPIS č. 7 *Jednotná ustanovení pro schvalování předních a zadních obrysových svítlen, brzdových svítlen a doplňkových obrysových svítlen motorových vozidel (s výjimkou motocyklů) a jejich přípojných vozidel*. E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.6/Rev.6. Březen 2014.
6. PŘEDPIS č. 38 *Jednotná ustanovení pro homologaci zadních mlhových svítlen pro motorová vozidla*. E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.37/Rev.3. Listopad 2012.
7. PŘEDPIS č. 87 *Jednotná ustanovení pro homologaci denních svítlen motorových vozidel*. E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.86/Rev.3. Březen 2013.
8. SMOLÍK, J. *Současnost a budoucnost automobilového osvětlení*. In: Světlo [online]. 2015, 2. [cit. 2014-11-23]. Dostupné z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=44730](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=44730)>
9. *Bezpečnost vozidel silničního provozu*. VUTBR.cz [online]. [cit. 2014-10-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.vutbr.cz/usi/dokumenty/dokumenty-ke-stazeni-f23776/bezpecnost-vozidel-silnicniho-provozu-materialy-k-predmetu-d75943/07-osvetleni-vozidel-pdf-p67168>>
10. *Osvětlení pro osobní automobily*. Osram [online]. 2015 [cit. 2015-01-14]. Dostupný z WWW: <[http://www.osram.cz/osram\\_cz/pouziti/automobilovy-prumysl/osvetleni-pro-osobni-automobily/index.jsp](http://www.osram.cz/osram_cz/pouziti/automobilovy-prumysl/osvetleni-pro-osobni-automobily/index.jsp)>
11. PEITZ, W. *Basics in automotive (front) - lighting*. Internal document. HELLA AUTOTECHNIK s.r.o. 2012.
12. SOKANSKÝ, K., A KOL. *Světelná technika*. Praha 2011.
13. *Led lamps: led binning*. Philips [online]. 2015 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z WWW: <[http://www.lighting.philips.com/pwc\\_li/main/connect/Lighting\\_University/internet-courses/LEDs/led-lamps6.html](http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/connect/Lighting_University/internet-courses/LEDs/led-lamps6.html)>
14. HADCO [online]. *LED Binning*. Tech Papers. [cit. 2015-02-03] Dostupné z WWW: <[http://www.hadco.com/Hadco/Upload/Content/downloads/techPapers/Philips\\_Hadco-Information\\_Brief\\_LED\\_Binning.pdf](http://www.hadco.com/Hadco/Upload/Content/downloads/techPapers/Philips_Hadco-Information_Brief_LED_Binning.pdf)>
15. PRINS, C. R., ET AL. *An inverse method for the design of TIR collimators to achieve a uniform color light beam*. CASA Report 12-09 [online]. 2012 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.win.tue.nl/analysis/reports/rana12-09.pdf>>

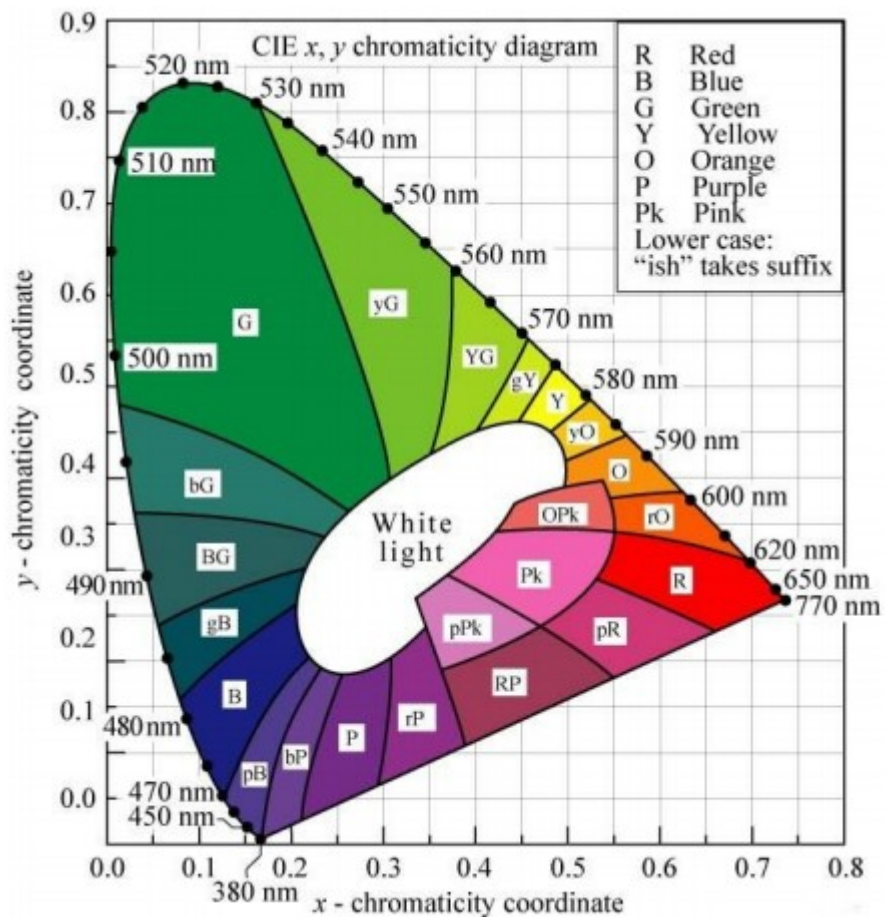
16. TECHNTEAM [online]. *Video photometer imaging light and colour measuring technique*. Katalog výrobku. [cit. 2015-02-17]. Dostupné z WWW: <[http://www.technoteam.de/apool/tnt/content/e5183/e5432/e5733/e6644/LMK\\_ger.pdf](http://www.technoteam.de/apool/tnt/content/e5183/e5432/e5733/e6644/LMK_ger.pdf)>
17. OLIVÍK, M. *Basis of LED Technologies*. Internal document. HELLA AUTOTECHNIK s.r.o. 2010.
18. ASHDOWN, I. *Thinking photometrically part II*. In: Helios 32 [online]. 2001 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.helios32.com/Thinking%20Photometrically%20II.pdf>>
19. HENGSTBERGER, F, ET AL. *CIE 70 The measurement of absolute luminous intensity distributions*. Vídeň 1987.
20. BARTOŠ, R., ČÍDLOVÁ, H., KABÁTKOVÁ, Š. *Aplikovaná chemie a moderní metody chemického výzkumu. Studijní materiál - vybrané kapitoly*. In: IS MUNI [online]. 2014 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z WWW: <[https://is.muni.cz/el/1441/podzim2014/CH2MP\\_1W1S/um/studijni\\_material.pdf](https://is.muni.cz/el/1441/podzim2014/CH2MP_1W1S/um/studijni_material.pdf)>
21. *Jaký je rozdíl mezi kolorimetrem a spektrofotometrem?* Kalibrace motorů [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.kalibrace-monitoru.eu/jaky-je-rozdil-mezi-kolorimetrem-a-spektrofotometrem/>>
22. SEOUL SEMICONDUCTOR [online]. *Specification SSC-Z5 series.*. Katalog výrobku. 2012 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z WWW: <[http://www.seoulsemicon.com/\\_upload/Goods\\_Spec/SZW05A0B.pdf](http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/SZW05A0B.pdf)>
23. OSRAM [online]. *Světelné zdroje pro automobily*. Katalog výrobků. 2014/2015 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.osram.cz/media/resource/HIRES/541742/2015-vehicle-lamps-catalogue-automotive-cz-.pdf>>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

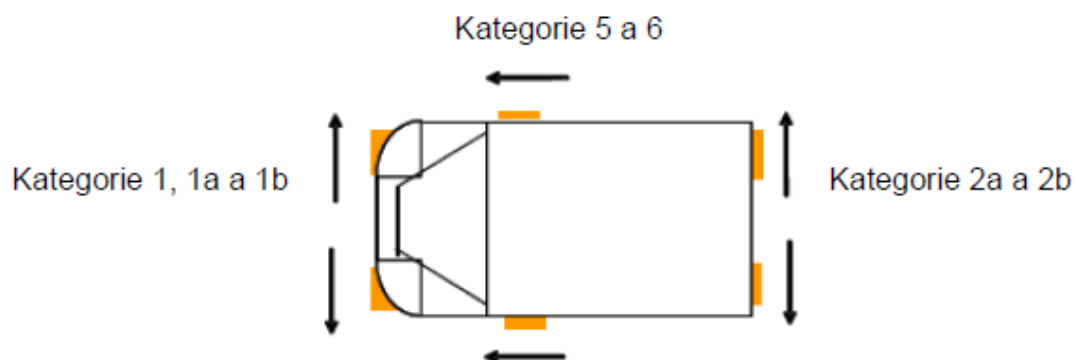
- I. *Jaký typ autožárovky potřebujete?* Auto-moto-elektronika [online]. [cit. 2014-10-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.auto-moto-elektronika.cz/Jaky-typ-autozarovky-potrebuje>>
- II. PŘEDPIS č. 112 *Jednotná ustanovení pro homologaci světlometů motorových vozidel, které vyzařují asymetrické potkávací světlo nebo dálkové světlo nebo obojí a které jsou vybaveny žárovkami a/nebo LED moduly.* E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.111/Rev.2. Listopad 2012.
- III. ROCHOLL, J. *Photometric equipment engineering for signal- & headlamps at Hella.* Internal document. HELLA AUTOTECHNIK s.r.o. 2011.
- IV. PŘEDPIS č. 19 *Jednotná ustanovení pro schvalování předních mlhových světlometů motorových vozidel.* E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.18/Rev.7. Březen 2014.
- V. PŘEDPIS č. 6 *Jednotná ustanovení pro schvalování směrových světlometů motorových vozidel a jejich přípojných vozidel.* E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.5/Rev.5. Březen 2014.
- VI. PŘEDPIS č. 7 *Jednotná ustanovení pro schvalování předních a zadních obrysových světlometů, brzdových světlometů a doplňkových obrysových světlometů motorových vozidel (s výjimkou motocyklů) a jejich přípojných vozidel.* E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.6/Rev.6. Březen 2014.
- VII. PŘEDPIS č. 38 *Jednotná ustanovení pro homologaci zadních mlhových světlometů motorových vozidel.* E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.37/Rev.3. Listopad 2012.
- VIII. PŘEDPIS č. 87 *Jednotná ustanovení pro homologaci denních světlometů motorových vozidel.* E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.86/Rev.3. Březen 2013.
- IX. SMOLÍK, J. *Současnost a budoucnost automobilového osvětlení.* In: Světlo [online]. 2015, 2. [cit. 2014-11-23]. Dostupné z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=44730](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=44730)>
- X. *Lumen Rating Info.* Impulse Lights [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.impulselights.com/lumen-rating-info.html>>
- XI. *CAS 140CT - The Standard for Array Spectrometers.* Instrument systems light measurement [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.instrumentsystems.com/products/spectrometers/cas-140ct>>
- XII. STRACHOTA, P. *Lidský zrak, vnímání a reprezentace barev* [online]. Praha: ČVUT, 2013 [cit. 2015-02-11]. <<http://saint-paul.fifi.cvut.cz/base/sites/default/files/POGR/POGR1/03.barvy.pdf>>
- XIII. Interní zdroj Hella Autotechnik, s. r. o.
- XIV. SEOUL SEMICONDUCTOR [online]. *Specification SSC-Z5 series.* Katalog výrobku. 2012 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z WWW: <[http://www.seoulsemicon.com/\\_upload/Goods\\_Spec/SZW05A0B.pdf](http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/SZW05A0B.pdf)>
- XV. *Doporučujeme: Hity týdne 07/2015.* AUTO.cz [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.auto.cz/doporuujeme-hity-tydne-07-2015-85800>>
- XVI. HENGSTBERGER, F, ET AL. *CIE 70 The measurement of absolute luminous intensity distributions.* Vídeň 1987.

## SEZNAM PŘÍLOH

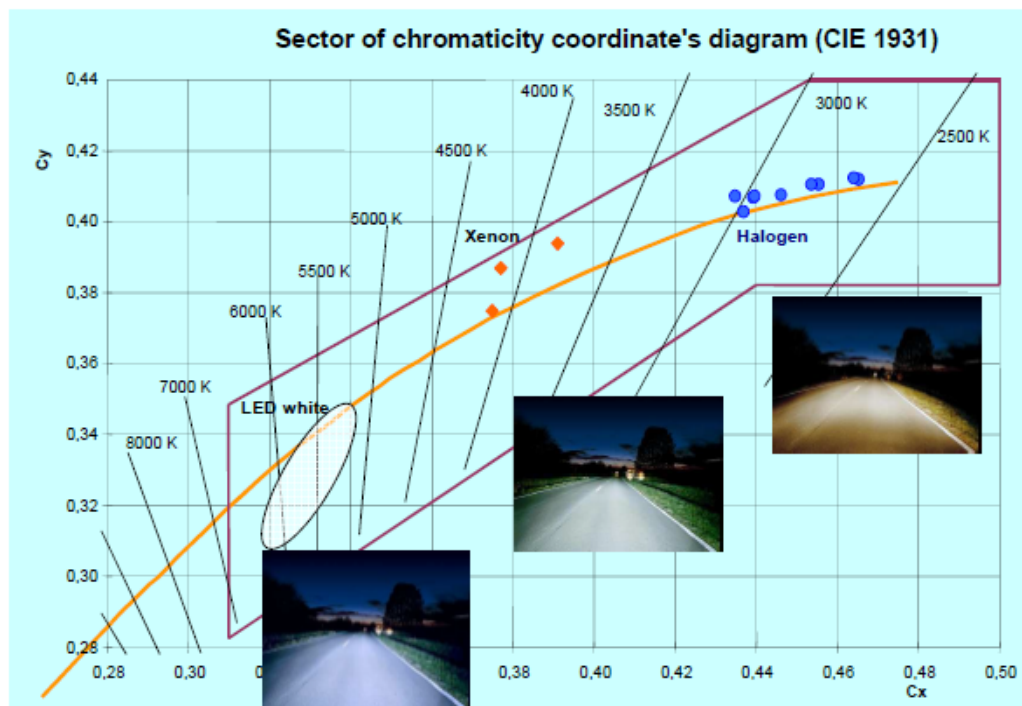
### *Příloha č. 1: Kolorimetrický trojúhelník [XII]*



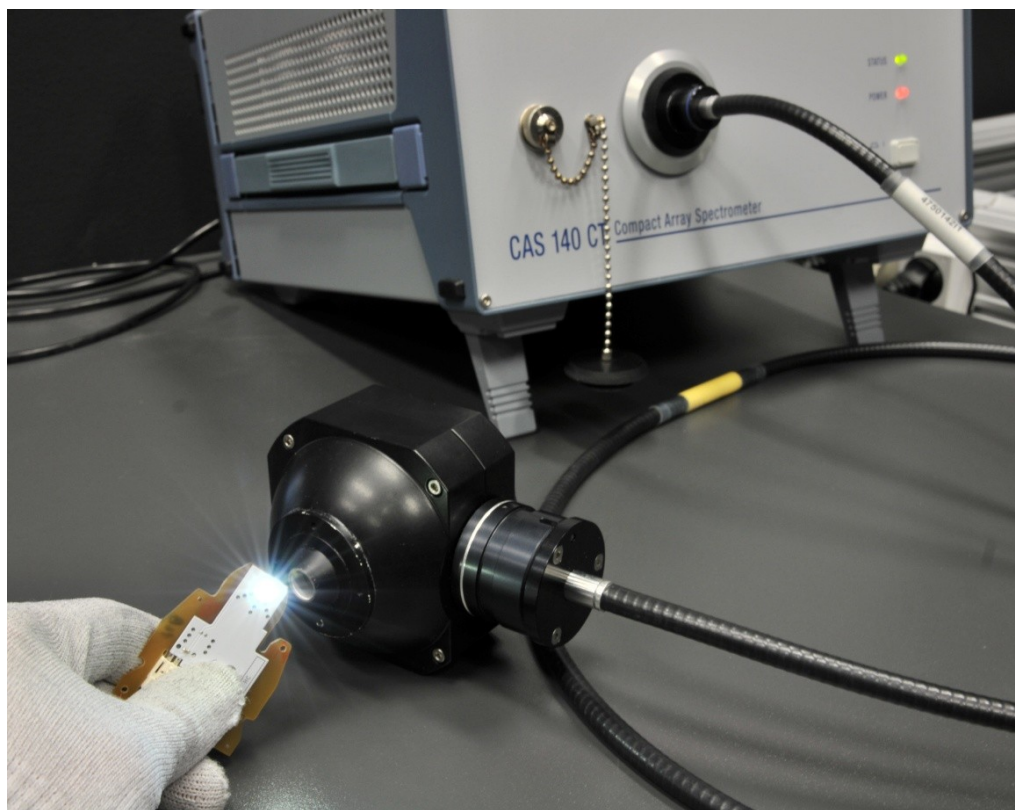
### *Příloha č. 2: Kategorie směrových svítílen [V]*



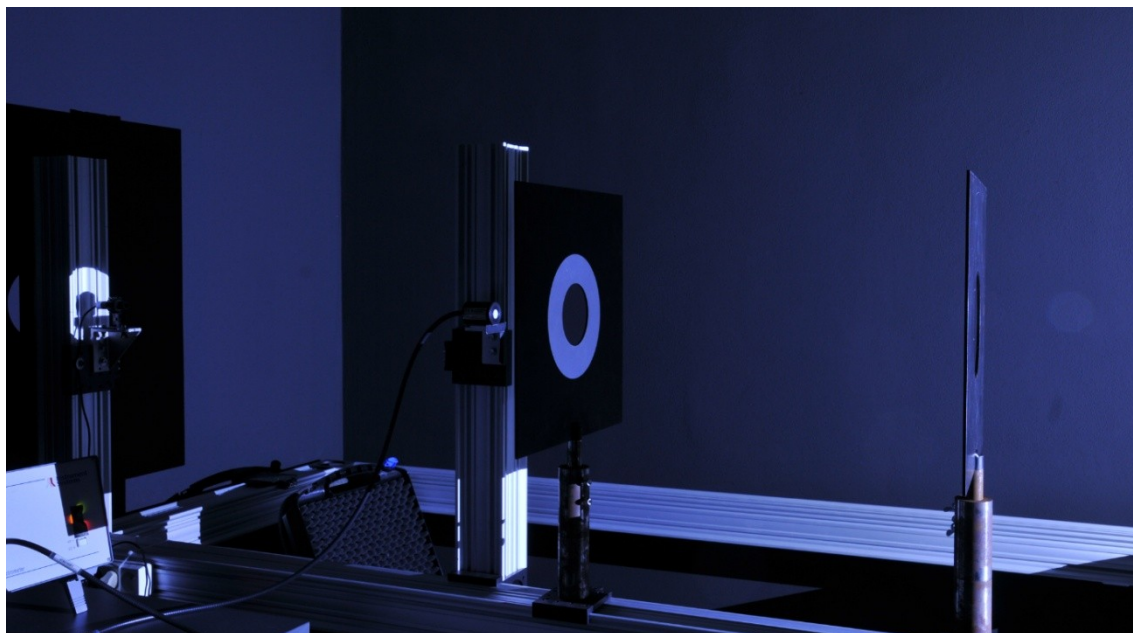
**Příloha č. 3: Srovnání spektrálních vlastností světelných zdrojů [III]**



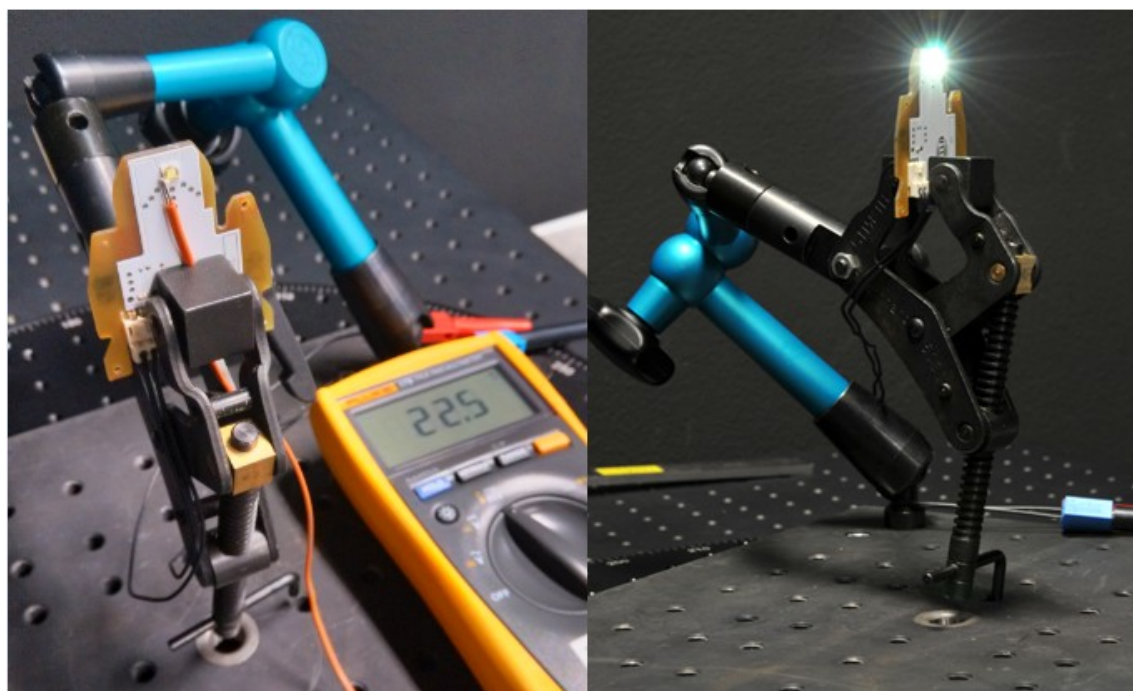
**Příloha č. 4 a): Měření příkládacím kulovým integrátorem**



***Příloha č. 4 b): Měření spektrofotometrem s čidlem luxmetru***



***Příloha č. 4 c): Uchycení PCB s LED SEOUL SSC – Z5***



***Příloha č. 5: Katalogové listy LED - SEOUL SSC - Z5 a použitých měřicích přístrojů se nacházejí na přiloženém CD***